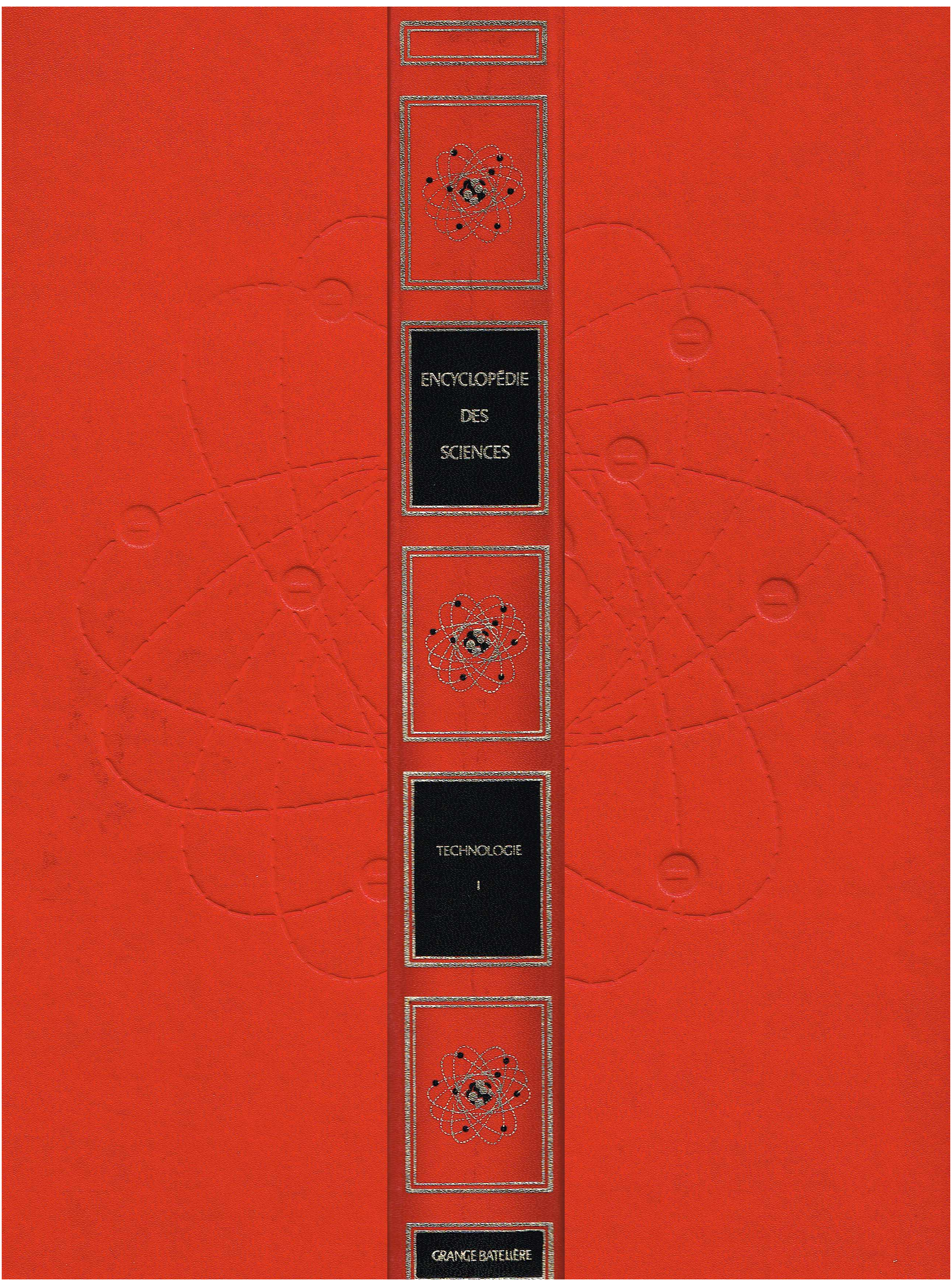

ENCYCLOPÉDIE
DES
SCIENCES
TECHNOLOGIE
I
GRANGE BATELIÈRE

LEXIQUE DE TECHNOLOGIE (ÉNERGIE)

SUPPLÉMENT AU VOLUME XVI DE LA GRANDE ENCYCLOPÉDIE ALPHA DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES

ABRÉVIATIONS

adj.	adjectif	*n.*	nom	*syn.*	synonyme
ex.	exemple	*par ext.*	par extension	*v.*	verbe

A

abaque. *n.* Graphique permettant de résoudre des calculs ou de trouver des coefficients.

acier trempé. Acier qui a subi l'opération de la trempe (voir ce mot).

adiabatique. *adj.* Se dit d'une transformation d'un système qui s'effectue sans échange de chaleur avec l'extérieur. Ainsi, le cycle théorique d'un moteur comporte une ou plusieurs transformations adiabatiques.

admission. *n.* Phase du cycle d'un moteur à explosion correspondant à l'entrée des gaz dans le cylindre.

adsorption. *n.* Rétention d'un gaz ou d'un liquide à la surface d'un solide, lequel est qualifié d'*adsorbant*. Fixer par adsorption = *adsorber*.

aérobie. *adj.* 1° Se dit d'un être vivant dont l'existence exige la présence d'oxygène. 2° Un moteur *aérobie* est un moteur qui utilise l'oxygène comme comburant (voir ce mot).

aéromagnétisme. *n.* Prospection aérienne des variations du magnétisme terrestre.

aérosol. *n.* Suspension dans un gaz de particules très fines.

affréteur. *n.* Celui qui loue un navire (celui qui le donne en location étant le *fréteur*).

agent polluant. Facteur (matière, rayonnement, chaleur...) contribuant à rendre malsain un milieu et à en perturber l'équilibre écologique.

aimant permanent. Barreau d'oxyde de fer ou d'acier qui a la propriété d'attirer le fer. Les bobines ont la même propriété quand elles sont traversées par un courant.

alésage. *n.* 1° Régularisation très précise du diamètre intérieur d'un tube. 2° Dans un moteur, l'alésage d'un cylindre est le diamètre intérieur de ce dernier.

aliphatique. *adj.* Se dit des corps organiques acycliques (ou à chaînes ouvertes).

âme. *n.* Centre, noyau ; armature en fer.

ampère. *n.* Unité d'intensité du courant électrique. Intensité du courant dans deux fils électriques parallèles, rectilignes, distants de 1 mètre dans le vide, et produisant entre ces deux fils une force de $2 \cdot 10^{-7}$ newton. Symbole : A.

anaérobie. *adj.* 1° Qualifie un être pouvant vivre en l'absence d'oxygène. 2° Un moteur *anaérobie* n'utilise pas l'oxygène de l'air. Il peut fonctionner en dehors de l'atmosphère.

anhydride. *n.* Corps qui, en se combinant avec l'eau, peut donner naissance à un acide.

anion. *n.* Atome ou édifice polyatomique qui a reçu une ou plusieurs charges négatives et qui par conséquent est chargé négativement.

anticlinal. *n.* En géologie, se dit de la partie convexe d'un pli simple.

arbre à cames. Mécanisme utilisé pour commander la levée des soupapes ou la mise en route des pompes d'injection. Arbre à cames en tête : arbre à cames au-dessus du moteur.

arbre-manivelle. Voir *vilebrequin*.

argon. *n.* Corps simple, gazeux, incolore, qui constitue environ le centième de l'atmosphère terrestre.

aromatique. *adj.* Qui a une odeur. En chimie, hydrocarbures aromatiques : famille d'hydrocarbures dérivés de benzène et comportant au moins un noyau benzénique.

athermique. *adj.* Une réaction qui, pendant son déroulement, n'absorbe ni ne dégage de chaleur est athermique.

atomiseur. *n.* Appareil servant à la pulvérisation des liquides.

attelage. *n.* Système bielle-manivelle.

aubage. *n.* Distributeur fixe dans une turbine à vapeur. Syn. : *tuyère*.

aube. *n.* Partie d'une roue hydraulique sur laquelle s'exerce la force motrice de l'eau.

B

balai. *n.* En électrotechnique, le balai désigne une masse de charbon aggloméré servant de contact entre une pièce fixe et une pièce mobile. Voir *collecteur*.

bar. *n.* Unité de mesure de la pression, le bar vaut 750 mm de mercure. Voir *tableau des unités* en fin de lexique.

barbotage. *n.* Passage d'un gaz à travers un liquide. Le barbotage est utilisé pour laver des fumées.

barge. *n.* Péniche sans moteur et sans cabine, sorte de bateau-cuve poussé à l'arrière (souvent par groupe de deux ou quatre) par un bateau-moteur indépendant, appelé pousseur.

barril. (U.S.). Unité de volume équivalent à $158{,}98 \cdot 10^{-3}$ m^3. Symbole : b.b.l.

benzène. *n.* Hydrocarbure cyclique de formule brute C_6H_6 ; liquide incolore, volatil, combustible.

benzol. *n.* Mélange de benzène, de toluène et de xylènes, extrait des goudrons de houille. Le benzol peut être utilisé comme carburant dans un moteur à explosion.

bielle. *n.* Pièce reliant deux pièces mobiles auxquelles elle est reliée par des articulations. Dans un moteur à explosion, la bielle sert à transmettre l'effort moteur reçu par le piston (voir *bielle-manivelle* et *piston*). La bielle d'accouplement sert à répartir l'effort moteur entre des essieux accouplés.

bielle-manivelle. *n.* Système permettant de transformer un mouvement rectiligne alternatif en un mouvement circulaire uniforme et réciproquement. L'ensemble bielle-manivelle s'appelle aussi *attelage*.

bilan différentiel de l'énergie. Conditions différentielles que doit satisfaire une équation de distribution de l'énergie dans le temps et dans l'espace.

biseau stratigraphique. En géologie, extrémité d'une couche sédimentaire en contact avec un socle ancien de pente différente.

bitume. *n.* Mélange d'hydrocarbures naturels, ou pyrogènes, entièrement solubles dans le sulfure de carbone. Dans le langage courant, désigne à la fois des produits contenus dans les roches asphaltiques naturelles et le résidu du raffinage du pétrole.

bobinage. *n.* Fil électrique isolé, enroulé en spire serrée sur un cylindre ou un tore. Le bobinage dans lequel circule un courant est un inducteur. On dit aussi *bobine*.

bobine. *n.* Cylindre sur lequel sont enroulés un ou plusieurs bobinages. Ce bobinage lui-même.

bobine d'allumage. Petite bobine d'induction utilisée pour l'allumage du carburant dans un moteur à explosion. La bobine d'allumage fournit du courant haute tension.

bouilleur. *n.* En technologie : 1° Cylindre métallique disposé en dessous d'une chaudière pour augmenter la surface de chauffe. 2° Réacteur nucléaire de petites dimensions, dans lequel la matière active est un sel d'uranium dissous dans l'eau ordinaire.

brai. *n.* Résidu pâteux de la distillation de la houille ou du pétrole.

brûleur. *n.* Appareil où se produit le mélange du combustible avec l'air. Les flammes se forment à la sortie du brûleur.

buse. *n.* Extrémité d'un tuyau. Dans un carburateur, la buse est un tuyau étranglé entourant le gicleur et où s'opère le mélange air-essence.

B.W.R. (boiling water reactor). Réacteur dans lequel le refroidissement est obtenu par vaporisation d'eau à 280 °C sous 70 bars. Voir *tableau* en fin de lexique.

C

caboteur. *n.* Bateau assurant une navigation marchande le long des côtes, et spécialement entre les ports d'un même pays.

caesium ou **césium.** *n.* Métal rare, de numéro atomique 55, ayant des propriétés voisines de celles du potassium.

calandre. *n.* Dans un échangeur à faisceau, garniture dans laquelle est placé un faisceau de tubes. Le fluide chauffant circule dans la calandre à l'extérieur des tubes du faisceau dans lesquels circule le fluide chauffé.

calfater. *v.* Mettre de l'étoupe et, par dessus, du suif, du goudron ou du bitume dans les joints, trous et fentes de la coque d'un bâtiment.

calorie. *n.* Unité de quantité de chaleur. Énergie nécessaire pour élever de 1 °C la température de 1 g d'eau à 15 °C sous pression atmosphérique normale. Symbole : cal.

calorifique. *adj.* Qui donne de la chaleur.

came. *n.* Roue pourvue d'une saillie ou d'une encoche, destinée à transmettre ou à commander le mouvement d'une machine. Dans le moteur à explosion, la came commande l'ouverture et la fermeture des soupapes d'échappement et d'admission par l'intermédiaire des culbuteurs.

capacité. *n.* Quotient de la charge d'un condensateur par la différence de potentiel entre ses armatures.

capacité d'un accumulateur. Pour un élément dont la différence de potentiel est connue, on exprime la capacité en ampère-heure. La *capacité énergétique* est égale à la capacité en ampère-heure multipliée par la d.d.p. *Ex. :* 15 Ah sous 2 V de tension correspondent à 30 Wh d'énergie.

capacité calorifique massique. Énergie calorifique nécessaire pour élever de 1 °C une unité de masse d'un corps. La capacité calorifique massique indique l'aptitude d'un corps à stocker la chaleur. Elle est variable avec la température du corps.

capital génétique. En biologie, cette locution désigne les informations ou caractéristiques qui sont transmises de génération en génération par les gènes. Pour une machine, le *capital génétique* représente l'ensemble des plans et informations qui permettent de la construire.

carbochimie. *n.* Chimie industrielle des produits issus de la houille.

carboduc. *n.* Conduite servant à transporter du charbon broyé en suspension dans l'eau.

carburateur. *n.* Appareil servant à préparer le mélange de comburant et de carburant dans un moteur.

carburéacteur. *n.* Carburant pour moteur à réaction ou turbine à gaz d'aviation.

carneau. *n.* Ouverture pratiquée dans l'enveloppe d'un four de manière à permettre la sortie des fumées dans la cheminée.

carter. *n.* Enveloppe protectrice des organes d'un moteur. Le carter est souvent supporté par la partie inférieure du bloc cylindre.

catalyse. *n.* Augmentation de la vitesse d'une réaction chimique par adjonction d'un corps *(catalyseur)* qui n'est pas modifié pendant la réaction.

cation. *n.* Atome ou édifice polyatomique qui a perdu une ou plusieurs charges négatives et qui a par conséquent une charge positive.

centrale plutonigène. Centrale qui produit du plutonium.

cerdoristique. *n.* Analyse des coûts en technologie. Ce terme a été introduit par Ampère.

cétane. *n.* Hydrocarbure saturé ($C_{16}H_{34}$) de faible délai d'inflammation. L'*indice de cétane* mesure l'aptitude d'un combustible Diesel à s'enflammer dans la chambre de combustion du moteur à compression, par rapport à des mélanges de référence de cétane (correspondant à l'indice 100) et d'α méthylnaphtalène (correspondant à l'indice 0).

chaland. *n.* Bateau non ponté destiné au transport des marchandises sur les rivières ou canaux.

chaleur de condensation. Chaleur libérée lors de la condensation d'une vapeur.

chaleur latente de changement d'état. La chaleur latente de changement d'état d'un corps à la température *t* est la quantité de chaleur nécessaire pour faire passer l'unité de masse de ce corps de l'état 1 à l'état 2 à cette température, la pression restant constamment égale à la pression d'équilibre des phases 1 et 2 à la température *t*.

chaleur massique. Quantité de chaleur à fournir à l'unité de masse d'un corps pour élever sa température de 1 °C. Dans le cas des gaz, on distingue la chaleur massique volumique, qui est la chaleur massique à volume constant, de la chaleur massique à pression constante.

champ de force. En physique, un champ est une portion d'espace ou s'exerce une action physique. Le champ de la force « pesanteur » est le champ de l'attraction terrestre.

changement de phase. Changement d'état d'une matière. *P. ex. :* passage de l'état liquide à l'état gazeux.

charbon en lit fluidisé. Couche de charbon pulvérisé.

chaudière sans faisceau. Chaudière dont les parois de la chambre de combustion sont tapissées de tubes remplis d'eau, jointifs, chauffés directement par le rayonnement.

chemise. *n.* Dans un moteur, garniture intérieure du cylindre dans laquelle glisse le piston.

chicane. *n.* Passage en zigzag ménagé à travers un obstacle. Des chicanes sont souvent utilisées dans les sorties vers l'atmosphère de gaz sous pression.

chute ohmique. Chute de tension entre les bornes d'une résistance électrique (U = RI).

cinématique. *n.* Étude des mouvements des corps, abstraction faite des forces qui les produisent.

cinétique. *adj.* Qui concerne le mouvement. L'énergie cinétique d'un corps en mouvement (par rapport à un repère donné) est égale à la moitié du produit de sa masse par le carré de sa vitesse.

circulation mécanique. Circulation d'un fluide obtenue par une pompe ou un ventilateur. Syn. de *circulation forcée,* opposée à *circulation naturelle.*

circulation naturelle. Déplacements d'un fluide provoqués par la différence de masse volumique entre le fluide chaud et le fluide froid.

claveter. *v.* Fixer au moyen d'une cale amovible.

coaxial. *adj.* Qui a le même axe qu'un ou plusieurs autres corps.

co-courant. Écoulement de deux ou plusieurs fluides dont les courants sont parallèles.

coefficient d'absorption (d'un rayonnement). Rapport du rayonnement absorbé par un corps au rayonnement total incident. Le coefficient d'absorption dépend de la qualité des rayons incidents.

coefficient d'émission (d'un rayonnement). Rapport de l'intensité énergétique émise par un corps donné à une température donnée à celle qui serait émise par un corps noir à la même température. Le coefficient d'émission dépend de la température du corps. Souvent noté α, s'exprime en W/m².

coefficient de transfert (thermique). Coefficient permettant de calculer le flux thermique entre une source froide et une source chaude, connaissant la différence de température entre les deux sources. Souvent noté U. Le coefficient de transfert thermique s'exprime en W/m² · °C.

coefficient de transmission (d'un rayonnement). Rapport entre le rayonnement incident et le rayonnement qui traverse un corps. La transmission dépend de la longueur d'onde du rayonnement incident.

cœur. *n.* Dans une centrale nucléaire le cœur est le siège des réactions nucléaires.

coffinite. *n.* Un des minerais de l'uranium.

coke. *n.* Combustible obtenu par distillation de la houille en vase clos.

collecteur. *n.* En électrotechnique le collecteur désigne la partie mobile d'une dynamo qui est en contact avec un (ou plusieurs) balai fixe.

comburant. *adj.* et *n.* Se dit d'un corps qui, par combinaison avec un autre, amène la combustion de ce dernier.

combustion. *n.* Ensemble des phénomènes produits lorsqu'un corps se combine avec l'oxygène.

composition spectrale. La lumière est formée d'un ensemble de rayons de longueurs d'onde différentes. La composition spectrale est définie par l'intensité de chaque rayon.

compresseur. *n.* Appareil servant à comprimer un gaz. Notamment, appareil servant à liquéfier les vapeurs issues d'une turbine.

compression. *n.* Phase du cycle d'un moteur à explosion. Après l'admission, les soupapes sont fermées et le piston comprime le mélange de carburant et de comburant.

concasseur. *n.* Appareil servant à broyer une substance en éléments grossiers.

concentration. *n.* Teneur d'un solvant en matière dissoute. La concentration d'un soluté est dite élevée quand elle est proche de la saturation.

condensat. *n.* Liquide formé à la suite de la condensation d'une vapeur.

condensateur. *n.* Appareil servant à emmagasiner une charge électrique.

condenseur. *n.* Appareil servant à condenser la vapeur.

condition optimale de fonctionnement. Le meilleur fonctionnement pour un coût donné ; ou le meilleur coût de fonctionnement pour un objectif donné.

conductance. *n.* Inverse de la résistance électrique. L'unité de conductance est le mho, appelé parfois siemens.

conduction thermique. Transmission de la chaleur de proche en proche sans déplacement de matière. S'il y a déplacement de matière, on parle de *convection* (voir ce mot).

conductivité thermique. Voir *conduction thermique.*

conteneur. *n.* Caisse de dimensions normalisées pour le transport de marchandises. Dit aussi *container.*

contrainte d'extension d'un ressort. Force supportée par unité de surface de la section du métal constituant le ressort. *Contrainte limite d'extension :* contrainte maximale qui peut être supportée par le ressort sans déformation permanente.

contre-courant. Écoulement de deux fluides dont les courants sont parallèles mais de sens opposés.

convection. *n.* Mouvement pris par un fluide sous l'influence d'une variation de température. La convection d'un fluide dans un insolateur permet de récupérer l'énergie thermique. La convection est *forcée* lorsqu'on utilise un accélérateur pour faire circuler le fluide plus rapidement.

conversion bio-énergétique. Conversion de l'énergie par des processus biologiques. *Ex. :* photosynthèse, fermentation méthanique...

conversion électromécanique. Conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique ou réciproquement.

conversion de l'énergie. Changement de forme de l'énergie, *p. ex. :* conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique.

convertisseur électrique. Appareil dont la fonction est de transformer la fréquence et la tension du courant.

corps gris. Corps qui réfléchit aussi bien toutes les radiations. Il absorbe ou émet aussi bien tous les rayonnements, indépendamment de leur longueur d'onde.

corps noir. Absorbeur parfait de toutes les radiations thermiques quel que soit leur angle d'incidence. Des matières dont le coefficient d'absorption des radiations thermiques est élevé sont utilisées comme absorbeur dans les capteurs solaires (peintures noires, oxyde de cuivre).

corps opaque. Corps qui ne transmet pas les rayonnements.

corps radio-actifs. Nom donné aux corps dont les atomes peuvent se désintégrer en émettant des rayons α, β, γ.

corrélation. *n.* Relation réciproque entre deux choses. En statistiques, liaison entre deux variables aléatoires.

corrosif. *adj.* Se dit d'un liquide ou d'un gaz qui ronge les corps avec lesquels il est en contact.

couche limite. Zone d'écoulement d'un fluide, proche de la surface de la conduite, où l'écoulement reste laminaire. L'épaisseur de la couche limite dépend de la vitesse d'écoulement du fluide et de la rugosité de la paroi.

coulomb. *n.* Unité de quantité d'électricité équivalant à la quantité d'électricité transportée en 1 seconde par un courant de 1 ampère. Symbole : C.

couple électromagnétique. La force magnétique appliquée aux conducteurs répartis sur le périmètre du rotor se traduit par un couple mécanique agissant sur l'arbre qui lui est solidaire.

couplemètre. *n.* L'effet de deux forces parallèles, mais de sens contraires, qui agissent en deux points (symétriques) d'un solide est mesuré au moyen d'un couplemètre.

courants de Foucault. Courants électriques induits dans des masses métalliques placées dans des champs magnétiques variables.

court-circuit. *n.* Mise en relation directe (ou par un conducteur) de deux points de potentiel différent.

coussinet. *n.* Dans une machine, pièce cylindrique en métal doux dans laquelle peut tourner un arbre mobile.

craquage. *n.* Procédé de raffinage qui modifie la composition d'une fraction pétrolière par l'effet de la chaleur, de la pression, et parfois d'un catalyseur. Le mot *cracking* est parfois employé pour craquage.

créosote. *n.* Liquide incolore, d'odeur forte, caustique, extrait du goudron par distillation, et employé comme antiseptique.

croissance exponentielle. Se dit d'un accroissement qui, par unité de temps, est égal à la valeur déjà atteinte multipliée par une constante. Les accroissements ne sont donc pas constants comme dans le cas d'une *croissance linéaire* mais augmentent rapidement avec le temps.

cryogène. *adj.* Se dit d'un mélange réfrigérant.

cryogénie. *n.* Production de basses températures.

culasse. *n.* Couvercle fermant la partie supérieure des cylindres dans un moteur à explosion.

culbuteur. *n.* Dans un moteur à explosion, pièce assurant la commande des soupapes. La came agit sur le culbuteur pour ouvrir ou fermer les soupapes d'admission et d'échappement.

curie. *n.* Unité d'activité radionucléaire correspondant à un nombre de désintégrations de $3{,}7 \times 10^{10}$ par seconde. Symbole : Ci (voir *tableau des unités* en fin de lexique).

cyanamide calcique. Engrais azoté calcique.

cycle d'une batterie ou **d'un accumulateur.** Décharge à 80 % d'une batterie en un nombre d'heures déterminé et recharge. Le nombre de cycles réalisés sans que les qualités de l'accumulateur soient notablement modifiées est une bonne indication de la durée de vie de l'accumulateur.

cycle d'un moteur. Succession des opérations nécessaires au fonctionnement d'un moteur.

cylindre. *n.* Dans un moteur à explosion, pièce dans laquelle se meut le piston.

D

débit massique. Pour un fluide, masse circulant par unité de temps.

déca. Préfixe qui, placé devant une unité, la multiplie par 10. *P. ex. :* un décanewton = dix newtons.

déclencheur ampèremétrique. Appareil qui déclenche mécaniquement un rupteur, en fonction de l'intensité du courant qui le traverse.

déformation angulaire. Déformation, mesurée par un angle, qui se produit lorsqu'un ressort est soumis à des couples de torsion.

degré hygrométrique. Teneur de l'air en vapeur d'eau. Le degré hygrométrique varie avec la température.

dépression (d'un fluide). Affaiblissement relatif de la pression qui contribue à créer une aspiration.

détente. *n.* Augmentation du volume occupé avec diminution de la pression d'un gaz. Dans un moteur à explosion, la détente se fait après l'explosion. C'est pendant cette phase que le piston transmet une force qui entraîne le vilebrequin.

détonation. *n.* Combustion très rapide d'un mélange comburant-carburant. La vitesse de combustion dépend des proportions du mélange. Un mélange détonant est un mélange dont les proportions sont telles qu'il explose.

deutérium. *n.* Isotope de masse 2 de l'hydrogène.

diagenèse. *n.* Ensemble des phénomènes assurant la transformation d'une roche meuble en roche cohérente.

diagramme. *n.* Courbe représentant les variations d'un phénomène.

diagramme entropique. Diagramme où la température est représentée en ordonnée et l'entropie en abscisse. Le cycle de Carnot est représenté par un rectangle sur un diagramme entropique.

diamètre hydraulique (d'un ou plusieurs tubes). Rapport entre le volume occupé par le fluide dans le (ou les) tube(s) et la surface totale mouillée par le fluide.

diaphragme. *n.* Paroi mince séparant deux parties d'un mécanisme; dans le cas d'une turbine à diaphragmes, un diaphragme sépare deux étages successifs mais laisse passer l'arbre en son centre.

diélectrique. *adj.* Qui concerne les mauvais conducteurs de l'électricité. La constante diélectrique qui caractérise les isolants est un coefficient considéré par rapport au vide.

diffraction. *n.* Phénomène dû aux déviations que subissent les rayonnements, thermiques notamment.

diffusion. *n.* Transformation d'un rayonnement qui a une direction déterminée en un rayonnement diffus.

dimension critique ou **masse critique.** C'est la masse de matière fissile nécessaire pour qu'une réaction en chaîne puisse se développer.

disjoncteur. *n.* Interrupteur automatique de courant fonctionnant lors d'une variation anormale de l'intensité ou de la tension.

disque d'une turbine. L'arbre du rotor d'une turbine présente des disques qui portent les aubages. Il y a un disque par étage de la turbine.

dragline. *n.* De l'anglais, *drag :* herse, *line :* câble. Matériel mixte de terrassement se composant d'un ou plusieurs godets racleurs articulés.

ductilité. *n.* Propriété qu'a un corps de pouvoir être étiré sans se rompre.

durabilité. *n.* Qualité de ce qui est durable. Les essais de durabilité de pièces ou appareils conduisent à déterminer la durée de vie par des tests de vieillissement.

dynamique. *n.* Partie de la mécanique qui étudie les relations entre les forces et les mouvements.

dynamomètre. *n.* Instrument qui sert à mesurer l'intensité des forces.

E

eau lourde. Oxyde de deutérium (D_2O); liquide analogue à l'eau ordinaire (H_2O), qui est employé comme modérateur dans certaines piles atomiques.

ébullition. *n.* Phénomènes qui se produisent au moment où un corps passe de l'état liquide à l'état gazeux.

ébullition intranucléaire. Se dit lorsque les bulles de vapeur qui se forment dans une partie du liquide ne parviennent pas à la surface; la vapeur des bulles est réabsorbée par le liquide.

ébullition nucléée. Phase de l'évaporation d'un liquide pendant laquelle les bulles viennent crever à la surface.

échangeur de chaleur. Appareil dans lequel circulent deux fluides à températures différentes; l'un s'échauffe et l'autre se refroidit.

échangeur tubulaire aileté. Échangeur formé de tubes munis d'ailettes dont la fonction est d'augmenter la surface d'échange avec l'extérieur.

échappement. *n.* Dernière phase du cycle d'un moteur : le piston comprime les gaz brûlés qui s'échappent à travers le pot d'échappement.

écologie. *n.* Partie de la biologie qui étudie les rapports des êtres avec leur milieu naturel. Comme toutes les formes de vie dépendent les unes des autres, la rupture d'un équilibre écologique menace toutes les formes de vie à la fois.

économiseur. *n.* Dispositif qui réchauffe l'eau d'alimentation d'une chaudière jusqu'à une température proche de celle de vaporisation, en utilisant la chaleur des fumées qui quittent la chaudière.

écoulement diphasique. Écoulement de deux phases (liquide et vapeur) dans un tube.

écoulement laminaire. Régime d'écoulement d'un fluide, qui s'effectue par glissement des couches (ou des filets) de fluide les unes sur les autres sans échange de particules entre elles. Opposé à *écoulement turbulent.*

écoulement turbulent. Régime d'écoulement d'un fluide tel que les particules du fluide sont animées d'un mouvement tourbillonnant. S'oppose à *écoulement laminaire*.

effet Joule. Transformation d'une énergie non thermique en énergie thermique. *P. ex. :* transformation d'un travail en chaleur.

effet de serre. Cet effet est réalisé en plaçant un absorbeur de couleur sombre derrière une matière transparente qui laisse passer la lumière mais empêche les pertes thermiques par convection.

effet de taille. Les coûts unitaires de production diminuent théoriquement quand la capacité des installations de production augmente. C'est ce qu'on appelle l'effet de taille.

effluent. *n.* Liquide ou gaz qui s'écoule. Effluents d'une usine : déchets fluides qui en sortent.

élasticité. *n.* Propriété qu'ont certains corps de reprendre leur forme quand la force qui les déformait a cessé d'agir.

élastique. *adj.* En économie, se dit d'une variable dont les variations dépendent de celles d'une autre variable.

électrogène. *adj.* Qui produit de l'électricité. Usage électrogène : utilisation d'une énergie primaire pour produire de l'électricité.

électropathologie. *n.* Science des maladies dues à l'électricité.

électrostatique. *adj.* Se dit des phénomènes qui concernent l'attraction ou la répulsion de charges électriques.

émanométrie. *n.* Étude de la désintégration du radium, thorium ou actinium par la mesure de leur émanation gazeuse (radon, thoron, actinon).

embiellage. *n.* Mécanisme permettant de transmettre et de transformer un mouvement.

embrayage. *n.* Mécanisme permettant d'établir la communication entre un moteur et les organes qu'il doit mettre en mouvement.

endothermique. *adj.* Une réaction est endothermique quand son déroulement provoque l'absorption d'une quantité de chaleur.

énergie fossile. Énergie sous diverses formes (pétrole, charbon, lignite...) résultant de la transformation de matière organique. La photosynthèse est à l'origine de la formation d'énergie fossile à partir d'énergie solaire.

énergie potentielle d'élasticité. Énergie accumulée par un corps élastique, équivalant au travail fourni lors du déplacement du point d'application de la force agissant sur le corps élastique.

énergie primaire. A proprement parler, seules les énergies solaires, gravitationnelles et nucléaires sont des énergies primaires. On considère aussi que des énergies transformées, mais non par l'homme, sont des énergies primaires (fuel, vent...).

énergie rayonnante. Énergie du rayonnement. Ce n'est pas une énergie thermique, mais elle est convertie en énergie thermique quand le rayonnement est absorbé par de la matière.

engrenage à chevrons. Engrenage formé de deux parties hélicoïdales de sens contraires.

engrener. *v.* Mettre en liaison deux roues dentées d'un engrenage.

enrichi. *adj.* Se dit de l'uranium dont on a augmenté la teneur en matériau fissile.

enroulement. *n.* Voir *bobinage*.

éolienne. *n.* Moteur actionné par le vent. Une éolienne électrique ou aérogénérateur transforme l'énergie cinétique du vent en électricité.

éponte. *n.* Terrain stérile qui borde et délimite un filon.

essieu. *n.* Pièce de métal portant une roue à chaque extrémité et supportant le poids du véhicule.

état (d'un système). Situation dans laquelle un système se trouve à un moment donné. La connaissance de l'état d'un système et des actions qui agiront sur lui permet de prévoir son état futur.

éthanol. *n.* Corps chimique dérivé de l'éthane (C_2H_6).

éthylène. *n.* Hydrocarbure gazeux incolore (C_2H_4) obtenu en déshydratant de l'alcool.

étude macroscopique d'un système. Étude de l'ensemble d'un système sans s'attacher au fonctionnement de telle ou telle partie du système.

évaporateur. *n.* Machine ou partie d'une machine servant à vaporiser un liquide.

évaporateur à double effet. Évaporateur dans lequel la chaleur de condensation de la vapeur est utilisée pour vaporiser un autre liquide.

évent. *n.* En technologie, chacun des orifices ménagés dans un moule de fonderie pour laisser échapper les gaz.

excavateur. *n.* Appareil servant à creuser une fouille (un trou important).

exothermique. *adj.* Une réaction est exothermique quand une certaine quantité de chaleur se dégage lors de sa réalisation.

F

facteur de charge. Le facteur de charge d'une centrale électrique est le rapport de la puissance appelée par la puissance installée. Le rendement augmente quand le facteur de charge se rapproche de 1.

fertile. *adj.* Se dit d'un corps qui peut être transformé en matière fissile. C'est le cas de l'uranium 238.

feuillard. *n.* Bande de fer large et très mince.

film de condensat. Faible épaisseur de fluide condensé sur une paroi.

film de vapeur. Un film de vapeur peut se former entre un liquide et une paroi fortement chauffée.

filonien. *adj.* En forme de filon.

fissile. *adj.* Susceptible de subir une fission.

fission. *n.* Éclatement d'un noyau d'atome lourd (uranium, plutonium...) en deux ou plusieurs fragments, déterminé par un bombardement de neutrons et libérant une énorme quantité d'énergie.

flèche d'un ressort. 1° Déformation d'un ressort due à l'action d'une contrainte. 2° Déformation correspondant à la contrainte limite.

flexibilité. *n.* Inverse de la rigidité.

flexion. *n.* Déformation d'un solide soumis à des forces agissant dans son plan de symétrie ou disposées symétriquement deux à deux par rapport à ce plan.

flottation. *n.* Procédé de séparation d'un mélange de corps broyés, utilisant la différence de tension superficielle de ces corps lorsqu'ils sont dans l'eau.

flotteur. *n.* Corps léger flottant sur le carburant dans la cuve d'un carburateur. Le flotteur porte le pointeau qui sert à bloquer l'arrivée de carburant quand le niveau normal est atteint.

fluide frigorifique. Fluide dont l'évaporation est utilisée pour produire des frigories (absorber des calories).

flux massique. Masse circulant par unité de temps. L'unité de flux massique est le kg/s. Syn. : *débit massique.*

force centrifuge. Force qui tend à éloigner du centre une masse animée d'un mouvement circulaire autour de ce centre.

fossé d'effondrement. Compartiment de l'écorce terrestre affaissé entre deux failles voisines ou entre deux faisceaux de failles (syn. : *fossé tectonique, graben*).

fréquence. *n.* Nombre de vibrations d'un phénomène périodique par unité de temps. L'unité de fréquence est le hertz qui correspond à une vibration par seconde.

fret. *n.* Rémunération due par l'affréteur (expéditeur de marchandises) à celui qui effectue le transport de marchandises.

frigorie. *n.* Unité calorifique équivalant à une kilocalorie négative. Symbole : fg.

$$1 \text{ frigorie} = -4{,}1855 \cdot 10^3 \text{ J}$$

fuel-oil. *n.* Combustible liquide dérivé du pétrole, obtenu par mélange de produits résiduaires et de produits intermédiaires de raffinage.

fusible. *n.* Partie d'un circuit électrique susceptible de devenir non conducteur en cas d'augmentation trop forte de l'intensité du courant. Le fusible est utilisé pour éviter la détérioration du matériel à la suite d'un court-circuit.

fusion. *n.* Union de plusieurs atomes légers (hydrogène, lithium) donnant des atomes plus lourds et un grand dégagement d'énergie. Une température extrêmement élevée est nécessaire pour réaliser la fusion.

G

gallon. *n.* Unité de volume équivalant à $4{,}546 \cdot 10^{-3}$ m^3.

gazéification. *n.* Transformation en gaz combustibles de produits contenant du carbone.

gazoduc. *n.* Canalisation pour le transport à longue distance de gaz naturel ou de gaz de cokerie.

gazomètre. *n.* Réservoir pour emmagasiner le gaz et pour le distribuer sous pression constante.

géothermie. *n.* Chaleur interne de la Terre.

gicleur. *n.* Orifice calibré servant à limiter le débit d'un fluide dans le carburateur.

giga. Préfixe qui, placé devant une unité, la multiplie par 10^9. *Ex. :* un gigawatt (GW) = 1 milliard de watts.

goujon. *n.* Cheville servant à assembler certaines pièces de construction ou de machines.

gradient de composition. Vecteur exprimant la variation dans l'espace de la composition d'un mélange.

gradient géothermique. Taux de variation de la température de la croûte terrestre en fonction de la profondeur.

graphite. *n.* Carbone naturel ou artificiel cristallisé, presque pur, gris-noir, tendre et friable.

gravimétrie. *n.* En physique, mesure de l'intensité du champ de la pesanteur. En chimie, analyse quantitative chimique effectuée par pesée. En minéralogie, méthode de séparation par densité des constituants d'un mélange.

gravité. *n.* Attraction terrestre exercée sur les corps.

grisou. *n.* Gaz inflammable composé en grande partie de méthane. Le mélange de grisou et d'air explose au contact d'une flamme (coup de grisou dans les mines de charbon).

H

haveuse. *n.* Machine pour exécuter la coupure pratiquée dans le front d'abattage d'une mine.

hélice d'aspiration. Hélice utilisée pour envoyer de l'air dans un échangeur.

hélicoïdal. *adj.* En forme d'hélice.

hélium. *n.* Corps simple gazeux, de numéro atomique 2, de densité 0,138, découvert dans l'atmosphère solaire, et qui existe en petite quantité dans l'air; très léger et ininflammable, il est utilisé pour gonfler les ballons.

heptane. Voir *indice d'octane.*

hexaphasé. *adj.* Se dit d'un courant qui comporte six phases.

humique. *adj.* Se dit d'une activité ou d'une substance que l'on trouve dans l'humus.

hydrate. *n.* Combinaison de l'eau avec une substance.

hydrazine. *n.* Composé basique de formule H_2N-NH_2.

hydrocarbure cyclique. Combinaison de carbone et d'hydrogène dont la molécule contient une chaîne fermée.

hydrure. *n.* Composé de l'hydrogène avec un autre corps simple.

hyperboloïde de révolution. 1° Surface engendrée par une hyperbole tournant autour de l'un de ses axes. 2° Solide limité par la surface définie précédemment.

hystérésis. *n.* Retard dans l'évolution d'un phénomène physique par rapport à un autre.

I

igné, ée. *adj.* Qui est de feu, qui a les qualités du feu.

impédance. *n.* Quotient de la tension efficace par l'intensité efficace d'un courant alternatif.

inconel. *n.* Alliage contenant du nickel. L'inconel 600 (nickel - chrome - fer) a une résistance mécanique élevée jointe à une excellente résistance à la corrosion chimique. Il est utilisé pour les pièces de four et supporte les hautes températures. L'inconel 718 (nickel - molybdène - aluminium) est utilisé pour les pièces d'avion et les roues de turbine.

indice de cétane. Voir *cétane.*

indice d'octane. Indice servant à mesurer la valeur antidétonante d'un carburant. L'octane (C_8H_{18}) a pour indice 100, l'heptane (C_7H_{18}) 0.

inducteur. *n.* Aimant permanent ou bobinage servant à créer un flux magnétique. Le flux d'induction créé par un électro-aimant varie avec le courant circulant dans le bobinage.

induction électromagnétique. Production de courant électrique dans un circuit par suite de la variation du flux magnétique (ou flux d'induction) qui le traverse.

infiniment allongé. Les modèles théoriques utilisant une dimension infiniment allongée sont utilisés pour décrire le fonctionnement de systèmes tels qu'une de leurs dimensions soit beaucoup plus grande que les autres. Le modèle d'un cylindre « *infiniment allongé* » est utilisé quand la longueur du cylindre est beaucoup plus grande que son diamètre.

infrastructure. *n.* Base matérielle d'une société (situation géographique, économie...); s'oppose à superstructure. Infrastructure d'importation : moyens matériels permettant l'importation (ports, pipelines...).

inhiber. *v.* Mettre un frein à l'activité. L'adjonction d'une substance inhibante pour une réaction permet de ralentir ou d'empêcher cette réaction. *P. ex. :* l'adjonction de plomb tétraéthyle dans l'essence permet d'empêcher la détonation dans le moteur (mais les résidus d'échappement qui contiennent du plomb sont alors toxiques).

injection. *n.* Action d'introduire sous pression. Dans un moteur à injection le carburant est injecté directement dans les cylindres au sein desquels se fait la carburation.

in situ. Locution signifiant « dans l'endroit même ». Plus spécialement employée en minéralogie.

insolateur. *n.* Partie d'un système de captation de l'énergie solaire qui est exposée aux rayons solaires et transforme l'énergie rayonnante en énergie thermique. Syn. de *capteur solaire.*

intensité efficace (d'un courant alternatif). Intensité d'un courant continu qui cède à une même résistance la même puissance calorifique que le courant alternatif considéré.

intérêts intercalaires. Intérêts des sommes engagées pour une construction, courant jusqu'à la date d'achèvement des travaux.

interface. *n.* Couche de séparation entre deux produits non miscibles.

inversion. *n.* De nombreux moteurs électriques peuvent fonctionner en générateur de courant, c'est-à-dire produire de l'électricité à partir d'énergie mécanique. Il s'agit d'une inversion de conversion.

ionisation. *n.* Production d'ions (particules chargées électriquement) dans un gaz ou un électrolyte.

isentrope. *adj.* 1° Se dit de deux états qui ont la même entropie. 2° Courbe des points de même entropie. 3° Transformation isentropique d'un système : transformation que ne modifie pas l'entropie du système.

isochore. *adj.* Se dit d'une transformation d'un système à volume constant.

isomérisation. *n.* Transformation d'une molécule pour former une molécule de même composition chimique et de même masse moléculaire, mais dont la structure et les propriétés chimiques diffèrent.

isotherme. *adj.* Se dit d'une transformation qui s'effectue à température constante. Courbe isotherme : courbe joignant les points d'égale température.

J - K

joule. *n.* Unité de travail. Travail d'une force de 1 newton dont le point d'application se déplace de 1 mètre dans la direction de la force.

jupe d'un piston. Surface latérale d'un piston, qui assure son guidage à l'intérieur d'un cylindre (Syn. : *fourreau*). La jupe (du piston) coulisse dans la chemise (du cylindre).

kérosène. *n.* Liquide pétrolier, distillant entre 150 et 300 °C, obtenu comme intermédiaire entre l'essence et le gas-oil à partir du pétrole brut.

kilotonne. *n.* Unité servant à mesurer la puissance d'une explosion en la comparant à l'énergie produite par mille tonnes de trinitrotoluène (T.N.T.). Symbole : kt.

L

laminage de la vapeur. Chute de la pression de la vapeur à la suite de son passage à travers un orifice étroit.

laminoir. *n.* Machine comportant des couples de cylindres entre lesquels passe une matière dont on veut réduire l'épaisseur.

laser. *n.* Appareil servant à produire des éclairs intenses de lumière cohérente, utilisé en télécommunication, biologie, médecine.

latent. *adj.* Se dit de ce qui n'est pas apparent. Chaleur latente (de vaporisation, de fusion...) : quantité de chaleur mise en jeu par un changement d'état effectué à température constante.

lentille de sable. Sable accumulé en forme de lentille dans le sol.

lignite. *n.* Roche combustible contenant 70 % de carbone, ayant souvent l'aspect du bois fossile.

limite d'élasticité d'un matériau. Valeur limite au-delà de laquelle la force agissant sur un matériau produit une déformation permanente.

liquéfaction. *n.* Passage, pour un corps, de l'état gazeux à l'état liquide. Voir *condensation.*

liqueur noire. Résidus polluants de l'industrie papetière.

lit à structure granulaire. Couche de particules solides de forme granulaire. Les transferts de chaleur dans un lit à structure granulaire dépendent du diamètre des particules.

lixiviation. *n.* Extraction des matières solides d'un mélange à l'aide de dissolvants appropriés.

longueur d'onde. Distance entre deux points consécutifs de même phase d'un mouvement ondulatoire.

lubrification. *n.* Action de graisser un mécanisme pour faciliter son fonctionnement.

lumière. *n.* Orifice d'entrée et de sortie des gaz dans le cylindre d'un moteur.

luminance. *n.* Quotient de l'intensité lumineuse émise par une surface, par l'aire apparente de cette surface, pour un observateur lointain.

luxmètre. *n.* Appareil servant à mesurer l'intensité de la lumière.

M

magnésiothermie. *n.* Méthode de réduction d'oxyde ou de fluorure métallique utilisant le magnésium.

magnétisme. *n.* Partie de la physique concernant les propriétés des aimants.

magnéto. *n.* Génératrice de courant électrique où le courant d'induction est produit dans un bobinage tournant dans le champ magnétique créé par un aimant. La magnéto permet à un moteur à explosion de tourner même quand la batterie ne peut plus fournir de courant.

magnétométrie. *n.* Mesure des grandeurs magnétiques. Étude des composantes du champ magnétique terrestre.

mandrin. *n.* Outil pour percer, pour emboutir une pièce, pour agrandir ou égaliser un trou.

maneton. *n.* Articulation démontable qui fait partie de la manivelle et qui réunit la tête de bielle et la manivelle.

manivelle. *n.* Levier coudé à angle droit, à l'aide duquel on imprime un mouvement de rotation continu à l'arbre sur lequel il est fixé.

masse linéique. Masse par mètre linéaire.

masse moléculaire. Somme des masses atomiques des éléments qui constituent la molécule d'un corps.

méga. Préfixe placé devant une unité et signifiant qu'on la multiplie par 10^6. *P. ex. :* 1 mégawatt (MW) = 1 million de watts.

métamorphose. *n.* Changement d'une forme en une autre.

méthanier. *n.* Navire conçu pour transporter du gaz naturel liquéfié.

méthanol. *n.* Composé dérivé du méthane de formule CH_3OH. Syn. : *alcool méthylique.*

meule. *n.* Corps solide de forme circulaire qui agit par abrasion.

micro-organisme. *n.* Organisme microscopique, végétal ou animal.

micropore. *n.* Interstice microscopique qui sépare les molécules d'un corps.

milieu alcalin. Milieu basique. Alcali est un synonyme de soude.

minéralisation. *n.* 1° Transformation d'un métal en minerai. 2° Transformation d'une substance non minérale par dépôt de minéraux sur la structure originelle.

miscible. *adj.* Qui peut former avec un autre corps un mélange homogène.

modérateur. *n.* Matière utilisée dans le cœur d'un réacteur nucléaire pour ralentir la réaction en chaîne.

module d'élasticité. Quotient de la force (ou du couple) agissant sur un corps par la déformation obtenue.

module d'une roue dentée. Quotient du diamètre de la roue par le nombre de dents.

molybdène. *n.* Métal (Mo) de numéro atomique 42, blanc, dur, cassant et peu fusible. On l'utilise pour fabriquer les aciers ferritiques.

moment d'inertie. Intégrale du produit de chaque élément de masse de ce corps par le carré de la distance de cet élément à un axe fixe appelé axe d'inertie.

monochromatique. *adj.* Se dit d'un rayonnement qui ne comporte qu'une seule longueur d'onde.

monoclinal, e, aux. *adj.* En géologie, se dit d'une structure où les couches appartiennent à un seul et même flanc de pli.

monophasé. *adj.* Se dit des courants alternatifs simples ainsi que des appareils produisant ou utilisant ces courants. S'oppose à *polyphasé.*

montage en parallèle. Montage de plusieurs récepteurs dont les bornes de même nom sont réunies électriquement. Opposé à *montage en série.*

montage en série. En électricité le montage en série se dit de plusieurs conducteurs (générateurs ou récepteurs) dont les bornes de noms contraires sont réunies électriquement, et qui sont parcourus par la même intensité de courant.

morphogenèse. *n.* Manière dont les formes sont créées.

moteur à combustion externe. Se dit d'un moteur où une chaudière chauffe au préalable un fluide caloporteur qui est ensuite utilisé pour produire l'énergie mécanique dans le moteur.

moteur à combustion interne. Moteur dans lequel l'énergie fournie par un fluide combustible est directement transformée en énergie mécanique.

moteur Diesel. Moteur à combustion interne, consommant des huiles et fonctionnant par auto-allumage du combustible injecté dans de l'air fortement comprimé. Un moteur semi-diesel fonctionne avec un taux de compression moins élevé mais nécessite un allumage électrique.

moteur stationnaire. Moteur qui reste en place. Pour ce type de moteur le critère rendement est privilégié par rapport au critère puissance massique.

moteur statique. Moteur qui ne comporte aucune pièce en mouvement. Il existe des moteurs statiques aérobies, statiques anaérobies, statiques à propulsion non chimique.

moteur synchrone. Moteur électrique dont la vitesse constante est déterminée par la fréquence du courant alternatif qui l'alimente.

mouvement aléatoire de particule. Expression pour désigner un mouvement tel qu'il n'est pas possible de connaître la trajectoire de la particule.

multiplicateur de vitesse. Système de transmission, tel que la vitesse de rotation à la sortie est supérieure à la vitesse de rotation à l'entrée. Syn. : *démultiplicateur.*

N

naphta. *n.* Hydrocarbure dont le point d'ébullition est compris entre 100 et 210 °C, obtenu à partir du pétrole ou du charbon. Généralement le naphta de pétrole est obtenu entre l'essence et le kérosène.

naphtalène. *n.* Hydrocarbure aromatique ($C_{10}H_8$) formé de deux noyaux benzéniques accolés. Naphtaline : naphtalène impur.

nappe phréatique. Nappe d'eau souterraine alimentant les sources.

neurotoxique. *adj.* Se dit d'un produit qui attaque le système nerveux.

neutrino. *n.* Particule subatomique de masse très petite et dénuée de charge électrique.

neutron. *n.* En physique, ce nom désigne un élément constitutif de l'atome qui est neutre électriquement.

newton. *n.* Unité de force. Force nécessaire pour communiquer à une masse de 1 kilogramme une accélération de 1 mètre par seconde carré. Symbole : N.

nominal. *adj.* Qui se fait en désignant les noms. Conditions nominales de fonctionnement : conditions de fonctionnement type qui sont nommément désignées (ou conditions types précises dont on suppose qu'elles sont connues).

normalisation. *n.* Ensemble de règles techniques résultant de l'accord des producteurs et des usagers, ou de la puissance publique, et visant à spécifier et unifier les caractéristiques de matériaux ou de machines, dans tous les domaines d'activités.

noyau. *n.* En électricité, partie d'un circuit magnétique sur lequel sont mis en place les enroulements du bobinage.

O

octane. *n.* Hydrocarbure saturé (C_8H_{18}), peu détonant, existant dans l'essence de pétrole. Voir *indice d'octane.*

off-shore. Désigne l'exploitation des gisements de matières premières (principalement pétrole et gaz naturel) qui est réalisée en pleine mer.

oléfines. *n.* Hydrocarbures éthyléniques de formule générale C_nH_{2n}, obtenus par craquage du méthane à la vapeur.

onduleur. *n.* Appareil transformant le courant électrique continu en courant alternatif. Certains onduleurs transforment le courant continu en courant alternatif sinusoïdal.

orogénie. *n.* Étude des dislocations de l'écorce terrestre.

oxydant. *adj.* Se dit d'un corps qui peut en oxyder d'autres, c'est-à-dire qui peut gagner des électrons lors d'une réaction chimique.

oxyde de carbone. Composé d'un atome d'oxygène avec un atome de carbone. L'oxyde de carbone est dangereux.

P

paléochenal, *n.* Chenal fossile.

paléogéographie. *n.* Science qui a pour objet l'étude de la répartition des mers et des continents au cours des époques géologiques.

paléorécif. *n.* Récif fossile.

pas d'une roue d'engrenage. Quotient de la circonférence de la roue par le nombre de dents.

pasteurisation. *n.* Opération dont le but est de détruire les germes pathogènes d'un aliment tout en conservant les vitamines. On peut la réaliser en portant l'aliment à une température inférieure à 100 °C pendant un certain temps.

pechblende. *n.* Oxyde d'uranium naturel, le plus important des minerais d'uranium, dont on extrait aussi le radium. Syn. : *péchurane et uraninite.*

période. *n.* La période d'un corps radio-actif est l'intervalle de temps nécessaire pour que sa radioactivité diminue de moitié.

perte de charge. Diminution de la pression d'un fluide circulant dans une tuyauterie. Différence du potentiel « pression » entre l'entrée et la sortie.

pétrographie. *n.* Étude de la formation et de la composition minéralogique des roches.

phase. *n.* 1° Toute partie homogène d'un mélange. 2° En phase : se dit de deux phénomènes périodiques qui varient de la même façon à tout instant.

phénol. *n.* Dérivé oxygéné du benzène que l'on extrait des huiles fournies par le goudron de houille. C'est un poison dont l'antidote est le sucrate de chaux.

phosphate. *n.* Sel de l'acide phosphorique.

photométrie. *n.* Mesure de l'intensité lumineuse.

photosynthèse. *n.* Synthèse d'un corps chimique, de substances organiques (glucides) à l'aide de l'énergie lumineuse, par les végétaux chlorophylliens. Toutes les énergies fossiles ont été produites par la photosynthèse.

pignon. *n.* La plus petite des roues dentées d'un couple d'engrenage cylindrique ou conique.

pile biochimique. Appareil produisant de l'énergie électrique grâce à l'action de micro-organismes sur des substances organiques.

pile à combustible. Cellule électrochimique qui produit une énergie électrique à partir de l'énergie chimique d'un combustible courant et d'un comburant qui est en général l'oxygène. *Ex.* : pile hydrogène-oxygène.

piston. *n.* Disque cylindrique, à frottement doux, se déplaçant dans le cylindre. Dans un moteur à explosion, le piston reçoit la poussée des gaz et la transmet à la bielle.

placer. *n.* Nom donné, en Californie et en Australie, aux lieux où l'on trouve de l'or.

planning. *n.* Plan détaillé et parfois chiffré définissant l'organisation rationnelle d'un travail.

plaque. *n.* Élément constitutif d'un accumulateur. La puissance électrique disponible dépend de la surface des plaques de l'accumulateur. Les batteries, dites de démarrage, qui doivent fournir une forte intensité pendant une courte période, ont une grande surface de plaque pour un poids de matière relativement faible par rapport aux batteries dites « fixes ou semi-fixes ».

plasma. *n.* État de la matière tel que les noyaux sont séparés de leur enveloppe électronique.

plutonium. *n.* Métal de numéro atomique 94, obtenu dans les piles à uranium. Il peut être utilisé pour fabriquer les bombes atomiques.

pneumoconiose. *n.* Affection chronique du poumon due à l'inhalation de poussières et particules solides.

pointeau. *n.* Tige conique supportée par le flotteur du carburateur, qui sert à régler le niveau de carburant dans la cuve du carburateur.

polarisation. *n.* Établissement d'une différence de potentiel entre deux conducteurs.

pôle. *n.* Chacune des extrémités d'un générateur ou d'un récepteur électrique, utilisées pour les connexions au circuit extérieur. Unipolaire : qui a un seul pôle. Multipolaire : qui a plusieurs pôles.

pollution thermique. Élévation de température d'un milieu provoquant la perturbation des équilibres écologiques.

polymérisation. *n.* Union de plusieurs molécules identiques pour former une molécule plus grosse.

polyphasé. *adj.* Se dit d'un système de *n* grandeurs sinusoïdales de même fréquence et déphasées l'une par rapport à l'autre de $\frac{2\pi}{n}$. Courant électrique triphasé : système de trois courants monophasés décalés l'un par rapport à l'autre de 1/3 de période.

pondérer. *v.* Modifier la valeur de certaines grandeurs.

pont roulant. Appareil de levage à champs d'action parallélépipédiques.

positon. *n.* Électron positif.

pouvoir calorifique. Capacité d'un combustible à fournir de l'énergie thermique.

pouvoir émissif. Aptitude d'une surface à émettre des rayons thermiques. Le pouvoir émissif varie suivant les différents corps et suivant la température. Syn. : *émissivité.*

pouvoir émissif monochromatique. Aptitude d'une surface à émettre un rayon d'une longueur d'onde déterminée.

pousseur. *n.* Bateau à moteur assurant le poussage d'un ou plusieurs chalands. Le pousseur consomme moins d'énergie que le remorqueur car les remous provoqués par l'hélice ne freinent pas les chalands.

précipitation. *n.* Dépôt qui se forme lors de l'apparition d'un corps chimique non soluble dans un solvant.

presse-étoupe. *n.* Dispositif empêchant un fluide sous pression de s'échapper par les interstices d'un joint.

pression hydrostatique. Pression résultant du poids d'une colonne d'eau.

pressuriser. *v.* Maintenir à l'intérieur une pression supérieure à la pression extérieure. Les réacteurs à eau pressurisée utilisent l'eau sous pression comme fluide de refroidissement. L'eau pressurisée à 155 bars ne bout pas à 320 °C.

primage. *n.* (mot anglais) Entraînement d'eau par la vapeur produite dans une chaudière.

primaire. *n.* Bobinage où circule un courant électrique qui crée un flux d'induction. Primaire d'une bobine d'allumage ou d'un transformateur, par exemple.

propergol. *n.* Type de corps dont la réaction chimique dégage une grande quantité d'énergie sans utiliser l'oxygène de l'air. Les moteurs à combustion anaérobies utilisent des propergols.

propulseur thermo-électrique. Moteur à combustion externe dont la chaudière associée est un arc électrique.

psychromètre. *n.* Appareil servant à mesurer le degré hygrométrique de l'air.

puissance active. Produit de la différence de potentiel par l'intensité efficace. Syn. : *puissance efficace.*

puissance appelée. Puissance débitée par une centrale sur le réseau de consommation. La puissance appelée varie avec le temps.

puissance installée. Puissance maximale que peut fournir une centrale. Syn. : *puissance nominale.*

puissance massique. Puissance d'un moteur par unité de poids de ce moteur. Les moteurs à forte puissance massique peuvent être utilisés pour l'aviation. Les moteurs à faible puissance massique sont souvent stationnaires.

puissance nominale. Puissance qui est fournie aux conditions nominales de marche. Voir *nominal.*

puissance du rayonnement sur une surface. Unité SI : watt par mètre carré (W/m^2). Calorie heure par centimètre carré.

$$1\ cal/h/cm^2 = 0{,}1163\ W/m^2\ (cal/h/cm^2).$$

Btu par heure par pied carré

$$1\ Btu/h/ft^2 = 3{,}13\ W/m^2\ (Btu/h/ft^2).$$

P.W.R. (pressurized water reactor). Réacteur à eau pressurisée. Le refroidissement est obtenu en faisant circuler de l'eau pressurisée à 155 bars environ qui ne bout pas à 320 °C. Voir *tableau* en fin de lexique.

pyrogénation. *n.* Réaction chimique produite par l'action de la chaleur.

pyrolyse. *n.* Décomposition d'un corps obtenue par chauffage sans action chimique.

pyromètre. *n.* Instrument de mesure des hautes températures.

Q - R

quantité de mouvement. Produit de la masse d'un corps par sa vitesse.

radial. *adj.* Disposé suivant un rayon. Dans une turbine radiale, la vapeur s'écoule suivant un rayon perpendiculaire à l'axe de la turbine.

radiométrie. *n.* Mesure des rayonnements émis par l'uranium et ses descendants.

rapport de réduction. Rapport entre les vitesses de rotation à l'entrée et à la sortie d'un engrenage.

ratio. *n.* Nom latin passé en anglais puis en français. Signifie rapport.

rayonnement diffus. Rayonnement constitué de rayons allant dans plusieurs (ou dans toutes) les directions. Un rayonnement complètement diffus ne peut pas être concentré par des procédés optiques.

rayonnement thermique. Rayonnement dont la longueur d'onde est comprise entre 0,2 μm et 100 μm. Son absorption par un corps provoque l'échauffement de celui-ci. Il comprend les infrarouges, la lumière visible et une partie des ultraviolets.

rayons cosmiques. Rayons de haute énergie provenant à la fois du Soleil, de l'espace interstellaire et des Galaxies.

rayons gamma (γ). Radiations émises par des corps radio-actifs, de longueur d'onde inférieure à celle des rayons X, donc plus pénétrantes. Leur action physiologique est puissante. Les radiations cosmiques contiennent des rayons γ.

rebouilleur. *n.* Appareil où la vapeur condensée est revaporisée.

récepteur. *n.* Appareil consommant du courant électrique.

récepteur d'un moteur électrique. Appareil utilisant l'énergie mécanique produite par le moteur.

réchauffeur d'air. Appareil situé après l'économiseur (sur le parcours des fumées) et qui utilise la chaleur des fumées pour réchauffer l'air avant de l'envoyer dans le foyer.

récupérateur de chaleur. Échangeur où la chaleur des effluents est utilisée pour préchauffer les fluides entrants.

redresseur. *n.* Appareil dans lequel le courant alternatif est transformé en courant unidirectionnel.

réducteur. *adj.* 1° En chimie : un corps réducteur est un corps qui peut céder des électrons. 2° En mécanique, se dit d'un mécanisme qui diminue la vitesse de rotation d'un arbre.

reformage. *n.* Raffinage d'une essence dont la composition est modifiée par l'effet de la température et de la pression. Le mot reforming est encore employé pour reformage.

réfractaire. *n.* et *adj.* Qui résiste à de très hautes températures.

réfrigération. *n.* Abaissement artificiel de la température ; production de froid. La réfrigération est produite par évaporation.

régime stationnaire. Régime d'un système dont les relations avec l'extérieur sont constantes.

régime variable. Régime d'un système dont les relations avec l'extérieur (et notamment les entrées) sont variables.

registre. *n.* En technologie, mécanisme réglant le débit d'un fluide.

réluctance. *n.* Rapport entre la force magnétomotrice d'un circuit magnétique et le flux d'induction qui le traverse.

répulsion. *n.* Résultat des forces qui tendent à éloigner deux corps l'un de l'autre. Deux parties aimantées de même polarité se repoussent.

réserve économique. Quantité d'un minerai qu'il est possible d'extraire à un coût inférieur à un prix donné (seuil critique).

réserves récupérables. Total du minerai existant et connu, tel qu'il existe une technologie permettant de l'extraire à un coût situé en deçà d'un seuil fixé.

résistance d'encrassement. Résistance supplémentaire aux flux thermiques qui sont dus à l'encrassement.

résistivité. *n.* Caractéristique électrique d'une substance conductrice ; elle est égale à la résistance d'un cylindre de cette substance de longueur égale à l'unité et de section égale à l'unité. Elle se mesure en ohm mètre (ou ohm mètre carré par mètre).

résonance. *n.* Grande augmentation de l'amplitude d'une oscillation sous l'influence d'impulsions régulières de même fréquence.

ressort de tarage. Le ressort de tarage permet de maintenir un orifice fermé jusqu'à ce que la pression dépasse un certain niveau.

rhéostat. *n.* Résistance variable qui, placée dans un circuit électrique, permet de modifier l'intensité d'un courant.

rhyolite. *n.* Roche éruptive voisine du granite.

rigidité d'un ressort. Rapport de la variation de la charge appliquée à la variation de la flèche consécutive à cette variation de charge.

rotor. *n.* Ensemble tournant dans les constructions mécaniques et électromécaniques. S'oppose aux parties fixes *(stator).* Le rotor d'une turbine est une masse mise en mouvement par le fluide en écoulement.

rupteur. *n.* Dispositif destiné à interrompre l'alimentation du circuit primaire de la bobine d'allumage, de façon que la haute tension soit débitée par le circuit secondaire à des moments précis.

S

salpêtre. *n.* Nom usuel du nitrate de potassium. Il se forme sur les murs et le sol dans les régions humides et tempérées. On pense que ce sont les Chinois qui l'ont utilisé la première fois pour fabriquer de la poudre.

schiste. *n.* Nom général des roches à texture feuilletée pouvant se diviser en lames.

secondaire. *n.* Bobinage où un courant électrique se crée sous l'effet d'une variation du flux d'induction. Secondaire d'une bobine d'allumage ou d'un transformateur de courant.

sectionneur. *n.* Appareil qui rompt la continuité d'un circuit électrique. Utilisé pour la sécurité mais ne fonctionne qu'à vide.

sédiment. *n.* Dépôt des matières dissoutes ou suspendues dans un liquide.

segment. *n.* Anneau élastique utilisé pour assurer l'étanchéité entre les deux parties du cylindre séparées par le piston.

semi-conducteur. Corps conduisant imparfaitement le courant électrique (dans un seul sens).

sismicité ou séismicité. *n.* Fréquence des tremblements de terre en un lieu donné.

sodium. *n.* Métal de numéro atomique 11, de densité 0,97, fondant à 98 °C. Il réagit violemment avec l'eau, c'est pourquoi l'irruption d'eau dans le sodium peut provoquer une explosion.

solubilité. *n.* Aptitude d'un corps à se dissoudre dans un solvant.

soluté. *n.* Corps dissous dans un liquide appelé solvant.

solution colloïdale. Qui a l'apparence de la colle de gélatine et ne peut être dialysée.

soufflage. *n.* Le soufflage de l'air (ou du comburant) dans une chaudière est assuré par un ventilateur. Le tirage et le soufflage doivent se compenser.

source de chaleur. Les machines thermiques fonctionnent avec deux sources de chaleur : la source chaude qui fournit des calories et la source froide qui absorbe des calories (ou fournit des frigories).

source de chaleur interne. Se dit d'une source de chaleur interne à un système étudié.

soutirage de vapeur. Utilisation de vapeur ayant déjà converti en travail une partie de son énergie thermique pour réchauffer l'eau d'alimentation.

statique. *n.* Branche de la mécanique qui a pour objet l'équilibre des systèmes de forces.

statique. *adj.* Qui demeure au même point (par opposition à dynamique).

stator. *n.* Partie fixe dans une machine qui comporte des pièces tournantes.

stellite. *n.* Série d'alliages contenant du cobalt, du chrome, du tungstène et du molybdène dans des proportions variables. Ces alliages très durs peuvent être utilisés pour protéger des surfaces soumises à l'usure.

stœchiométrie. *n.* Partie de la chimie qui étudie les rapports ou proportions suivant lesquels les corps réagissent.

stratigraphie. *n.* Partie de la géologie qui étudie les couches de l'écorce terrestre afin d'établir leur ordre normal de superposition et leur âge relatif.

stylistique. *n.* Étude des procédés de style. En linguistique, le style est la manière d'écrire vue sous le double point de vue du respect des règles et de l'art. En technologie, citons simplement l'exemple du style « rétro ».

subsidence. *n.* Lent mouvement d'affaissement de certaines parties de l'écorce terrestre sous le poids des dépôts sédimentaires et sous l'action de déformations.

supraconducteur. *n.* Se dit d'un métal qui a une résistivité presque nulle au-dessous d'une certaine température.

surchauffe. *n.* Opération consistant à chauffer la vapeur saturée, et qui permet d'augmenter la pression de la vapeur. Sur certaines turbines la surchauffe est réalisée pendant la détente.

surchauffeur. *n.* Partie d'une chaudière où la vapeur saturée précédemment produite est réchauffée au-dessus de la température de saturation, en vue d'augmenter son enthalpie.

surface sans flux. Surface qui n'émet pas de rayonnement thermique. Couple de surfaces tel que le débit net de chaleur rayonné entre les deux surfaces est nul.

surrégénérateur. *n.* Type de centrale nucléaire qui consomme peu d'uranium et produit des matières fissiles qui peuvent être réutilisées dans un autre surrégénérateur.

surtension. *n.* Tension électrique supérieure à la normale pouvant exister, en service normal, entre deux parties conductrices.

syénite. *n.* Sorte de roche granitique.

syntaxe. *n.* En linguistique, il s'agit de la manière dont les mots sont disposés dans une phrase qui a une signification. En technologie, il s'agit de la manière d'arranger les éléments d'une machine pour que celle-ci fonctionne.

système. *n.* Ensemble de corps considérés séparément de leur environnement.

T

tachymètre. *n.* Appareil servant à mesurer la vitesse.

tanker. *n.* Navire dont la coque elle-même est un réservoir et qui sert à transporter le pétrole.

techne. Premier élément de composition d'un mot introduisant l'idée de technique. *Ex. :* technologie, science des techniques.

tectonique. *n.* Partie de la géologie qui étudie les déformations des terrains, sous l'effet des forces internes, postérieurement à leur mise en place.

tellurure. *n.* Combinaison du tellure (numéro atomique 92) avec un autre élément.

température de saturation. Étant donné une vapeur, la température de saturation est la température minimale à laquelle peut être portée la vapeur sans qu'il y ait condensation.

température thermodynamique. Température en degrés Kelvin ou échelle absolue de température.

tensio-actif. Un produit chimique tensio-actif modifie les forces de tension surperficielle. Peut être utilisé pour faire des émulsions ou des flottations.

tension. *n.* En électricité, différence de potentiel; se mesure en volts. En thermodynamique, tension de vapeur = pression de vapeur.

terminal. *n.* Point d'aboutissement d'un pipe-line aménagé pour le déchargement des pétroliers près d'un littoral.

thaumaturgique. *adj.* Se dit d'une action qui tient du miracle.

thermie. *n.* Unité de quantité de chaleur. Énergie nécessaire pour élever de 1 °C la température d'une tonne d'eau à 15 °C sous pression atmosphérique. Voir *tableau des unités* en fin de lexique.

thermodiffusion. *n.* Diffusion de la chaleur dans un corps. Dépend de sa capacité calorifique et de sa conductibilité thermique.

thermodynamique. *n.* Étude des relations entre les phénomènes mécaniques et les phénomènes thermiques.

thermogène. *adj.* Qui produit de la chaleur. Usage thermogène : utilisation d'une énergie primaire pour produire de la chaleur.

thermomécanique. *adj.* Se dit des forces produites à partir de la chaleur.

thorium. *n.* Métal rare de numéro atomique 90, blanc, cristallin, de densité 12,1 et fondant vers 1 700 °C.

timbre d'une chaudière. Pression maximale qu'elle peut admettre sans danger. S'exprime en bars.

tirage. *n.* Aspiration des gaz brûlés d'une chaudière. Dans les grosses ou moyennes chaudières le tirage est assuré par un ventilateur.

titane. *n.* Métal de numéro atomique 22, blanc, dur, de densité 4,5, fondant à 1 800 °C, qui par ses qualités se rapproche du silicium et de l'étain. Symbole : Ti.

titre d'une solution. Rapport de la masse du corps dissous à la masse de la solution. *Titre d'une vapeur humide :* rapport entre la masse de vapeur et la masse totale de fluide.

tonne équivalent charbon. Quantité d'énergie correspondant à l'énergie disponible dans une tonne de charbon. Symbole : T.E.C.

tonne équivalent pétrole. Quantité d'énergie correspondant à l'énergie disponible dans une tonne de pétrole. Symbole : T.E.P.

torique. *adj.* Qui a la forme d'un tore, c'est-à-dire d'un solide de révolution engendré par un cercle tournant autour d'une droite située dans son plan mais ne passant pas par son centre.

topographie. *n.* Représentation sur un plan des formes d'un terrain avec tous les détails naturels ou artificiels qu'il porte.

torsion. *n.* Déformation subie par un solide sous l'action de deux couples opposés agissant dans des plans parallèles; chaque section du solide subissant une rotation par rapport à une section voisine.

tour de réfrigération. Appareil dans lequel un liquide est vaporisé. Le changement de phase se fait en absorbant des calories donc en produisant des frigories.

tourillonner. *v.* Tourner autour d'un pivot. Tourillon : pivot métallique autour duquel une pièce peut tourner.

trachyte. *n.* Classe feldspathique de roches volcaniques à pâte grossière.

transformation. *n.* Qui change la forme. Dans le chapitre *Transformation de l'énergie,* transformation de l'énergie signifie qui change les caractéristiques de l'énergie mais non la forme (thermique, électrique, rayonnante...).

transistor. *n.* Dispositif à semi-conducteur souvent à base de silicium qui, au même titre qu'un tube électronique, peut amplifier des courants électriques et assumer des fonctions de modulation.

transuranien. *adj.* Se dit des éléments chimiques de numéro atomique supérieur à celui de l'uranium (92). Il n'existe pas d'éléments transuraniens dans la nature.

trémie. *n.* Sorte de réservoir en forme de pyramide quadrangulaire tronquée et renversée. La trémie de chargement possède une ouverture sur le fond, ce qui permet de charger un véhicule passant en dessous.

trempe. *n.* Opération de traitement thermique qui consiste, par le refroidissement rapide d'un produit métallurgique, à maintenir à température ambiante soit une structure stable à chaud, soit une structure dérivée de cette dernière.

tritium (parfois **tritérium**). *n.* Isotope de masse 3 de l'hydrogène. Le noyau du tritium contient un proton et deux neutrons.

turbine. *n.* Moteur composé d'une roue mobile qui transforme en énergie mécanique l'énergie cinétique d'un fluide.

turbine à action. Turbine dans laquelle la vapeur est détendue dans un distributeur fixe.

turbine à circuit fermé. Le fluide utilisé reste à l'intérieur du système chaudière plus turbine et accomplit plusieurs cycles.

turbine à circuit ouvert. Un liquide est pompé, puis vaporisé. Après la détente il n'est pas réutilisé dans la turbine.

turbine à réaction. Turbine dans laquelle la vapeur est détendue dans le distributeur fixe et dans la roue mobile.

turbocompresseur. *n.* Compresseur rotatif centrifuge à haute pression, constitué d'une ou plusieurs roues à aubes montées en série sur le même arbre.

turbogénérateur. *n.* Générateur de courant électrique qui transforme l'énergie cinétique d'un fluide au moyen d'une turbine.

turbopropulseur. *n.* Propulseur composé d'une turbine à gaz, entraînant une ou plusieurs hélices par l'intermédiaire d'un réducteur (ne pas confondre avec turboréacteur).

tuyère. *n.* Élément de canalisation profilé, destiné à imposer à un fluide en écoulement une augmentation de vitesse.

U

ultracentrifugation. *n.* Centrifugation à un régime de rotation très élevé (plus de 60 000 tours/mn). Ce procédé est utilisé pour séparer des corps de densité très voisine.

uraninite. Voir *pechblende.*

uranium. *n.* Métal de numéro atomique 92, de densité 18,7. L'atome d'uranium peut subir une fusion en libérant de l'énergie lorsqu'il est irradié par des neutrons.

uranium enrichi. L'uranium naturel est composé de deux isotopes : uranium 235 et uranium 238. Enrichir l'uranium revient à augmenter la teneur en matière fissile (U 235).

V

valence. *n.* Propriété caractérisant les corps simples et qui représente le nombre d'atomes d'hydrogène pouvant se combiner à un atome du corps.

vapeur humide. Vapeur qui contient des gouttelettes de liquide.

vapeur saturée. A une pression et une température données, le volume occupé par une vapeur saturée d'un corps ne peut pas contenir une quantité supplémentaire de ce corps sous forme gazeuse.

vapeur sèche. Vapeur qui se trouve à une température supérieure à la température de saturation.

vaporisation. *n.* Transformation d'un liquide en vapeur. La vaporisation est un changement d'état qui absorbe de l'énergie : chaleur latente de vaporisation.

variation linéaire. Se dit quand il existe un coefficient constant de proportionnalité entre deux variables. *P. ex.,* le coefficient U varie linéairement en fonction de T signifie que $U = kT$ où k est constant.

vecteur énergétique. Se dit de ce qui transporte l'énergie. L'hydrogène, le gaz, le pétrole... sont des vecteurs d'énergie. Par extension du sens, les pipelines, les fils électriques peuvent être considérés comme des vecteurs énergétiques.

vilebrequin. *n.* Arbre qui transforme le mouvement rectiligne alternatif de l'ensemble piston-bielle, en un mouvement circulaire.

viscosité. *n.* Résistance d'un fluide à l'écoulement uniforme et sans turbulence.

viscosité cinématique. Rapport entre la viscosité dynamique d'un fluide et sa masse volumique.

viscosité dynamique. Le rapport entre la force tangentielle de viscosité engendrée sur un élément de surface séparant deux couches de fluide et cet élément de surface est proportionnel au gradient de vitesse entre les deux couches de fluide. Le coefficient de proportionnalité est la viscosité dynamique.

vitesse relative. Vitesse d'un objet par rapport à un observateur mobile. Le vecteur vitesse relative est égal au vecteur vitesse absolue moins le vecteur vitesse de l'observateur.

vitrification. *n.* Action de fondre les matières qui après refroidissement présentent la transparence et l'éclat du verre.

volatil. *adj.* Capable de s'évaporer.

volt. *n.* Unité de différence de potentiel. Le volt est la différence de potentiel qui existe entre deux points d'un fil conducteur parcouru par un courant constant de 1 ampère, lorsque la puissance dissipée entre ces deux points est de 1 watt. Symbole : V.

W - Z

watt. *n.* Unité de puissance équivalant à la production de 1 joule par seconde. Symbole : W.

weber. *n.* Unité de flux magnétique. Voir *tableau des unités* en fin de lexique. Symbole : Wb.

zone de desserte. Zone qui est desservie par une installation déterminée. *Ex. :* zone de desserte d'une raffinerie, d'une installation portuaire...

zone de radiation. Partie de la chaudière où les échanges thermiques se font surtout par radiation. Plus la chaudière travaille à température élevée, plus la zone de radiation est importante.

TABLEAU DE DIFFÉRENTS TYPES DE RÉACTEURS

	Spectre neutronique	Modérateur	Caloporteur	Combustible	Utilisation
UNGG	Thermique	Graphite	CO_2	U naturel	Électrogène
HTR	Thermique	Graphite	He	U enrichi	Électrogène Chaleur de procédé
GCFR	Rapide	—	He	U enrichi Pu	Électrogène Calogène
PWR	Thermique	H_2O	H_2O	U enrichi	Électrogène - Propulsion navale - Calogène
BWR	Thermique	H_2O	H_2O	U enrichi	Électrogène Calogène
LMFBR	Rapide	—	Na liquide	Pu	Électrogène Calogène

ABRÉVIATIONS

UNGG - Réacteur à uranium naturel graphite gaz.
HTR - (High temperature reactor) Réacteur à haute température.
GCFR - (Gas cooled fast reactor) Réacteur rapide refroidi par gaz.
PWR - (Pressurized water reactor) Réacteur à eau pressurisée.
BWR - (Boiling water reactor) Réacteur à eau bouillante.
LMFBR - (Liquid metal fast breeder reactor) Réacteur rapide surrégénérateur à métaux liquides.
HWR - (Heavy water reactor) Réacteur à eau lourde.
AGR - (Advanced gas reactor) Réacteur à gaz avancé.
SGHWR - (Steam generating heavy water reactor) Réacteur à eau lourde producteur de vapeur (Grande-Bretagne).
MSBR - (Molten salt breeder reactor) Réacteur surrégénérateur à sels fondus.

Multiples décimaux des unités			Sous-multiples décimaux des unités		
10^{1}	déca	da	10^{-1}	déci	d
10^{2}	hecto	h	10^{-2}	centi	c
10^{3}	kilo	k	10^{-3}	milli	m
10^{6}	méga	M	10^{-6}	micro	μ
10^{9}	giga	G	10^{-9}	nano	n
10^{12}	téra	T	10^{-12}	pico	p

T. E. P. Tonne équivalent pétrole*. **T. E. C.** Tonne équivalent charbon*. **1 bbl** = 1 barrel = 1 baril = 259 l.

Coefficients d'équivalence usuels :

1 **T. E. P.** = 1,5 **T. E. C.** = 4,5 MWh
Pour le gaz : 1 000 thermies **P. C. S.** = 0,1 **T. E. P.**
(**P. C. S.** signifie : pouvoir combustible supérieur)

Ordre de grandeur :

Une centrale nucléaire de 1 000 MW fonctionnant 80 % du temps marche 6 200 h dans une année et produit donc 1 000 × 6 200 = 6 200 000 MWh soit 6,2 TWh (térawatt/heure), ce qui équivaut à 1 400 000 **T. E. P.**

**Voir définition dans le lexique.*

UNITÉS DE MESURE

Grandeur	Dénomination	Symbole	Équivalences	Dimension
Longueur	mètre mille	m	 1 852 m	L
Aire	mètre carré	m^2		L^2
Volume	mètre cube litre stère	m^3 l st	 10^{-3} m^3 1 m^3	L^3
Masse	kilogramme tonne	kg t	 10^3 kg	M
Temps	seconde	s		T
Fréquence	hertz	Hz		T^{-1}
Vitesse	mètre par seconde nœud	m/s	 1 mille par heure	LT^{-1}
Accélération	mètre par seconde carrée	m/s^2		LT^{-2}
Force	newton dyne	N dyn	 10^{-5} N	LMT^{-2}
Énergie, travail ou quantité de chaleur	joule erg watt-heure calorie thermie frigorie	J Wh cal th fg	 10^{-2} J 3 600 J 4,1855 J $4{,}1855 \times 10^6$ J $-4{,}1855 \times 10^3$ J	L^2MT^{-2}
Puissance	watt cheval-vapeur	W ch	 735 W	L^2MT^{-3}
Pression	pascal bar atmosphère centimètre de mercure	Pa atm. cm Hg	 10^5 Pa 1,013 25 bar 1 bar = 75 cm Hg	$L^{-1}MT^{-2}$
Viscosité (dynamique)	poiseuille poise	Pl Po	 10^{-1} Pl	L^{-1} MT^{-1}
Intensité de courant électrique	ampère	A		A
Force électromotrice et différence de potentiel	volt	V		$ML^2T^{-3}A^{-1}$
Résistance électrique	ohm	Ω		$ML^2T^{-3}A^{-2}$
Quantité d'électricité	coulomb	C		AT
Intensité de champ électrique	volt par mètre	V/m		$MLT^{-3}A^{-1}$
Flux magnétique	weber	Wb		$ML^2T^{-2}A^{-1}$
Température	degré Kelvin degré Celsius	°K °C	t (°C) = T (°K) — 273	
Intensité lumineuse	candela	cd		
Flux lumineux	lumen	lm		
Éclairement	lux	lx		
Luminance	candela par m^2	cd/m^2		
Activité nucléaire	$seconde^{-1}$ curie	s^{-1} Ci	 $3{,}7 \times 10^{10}$ s^{-1}	
Quantité de rayonnement X ou γ	rœntgen	R		

INDEX DES NOMS CITÉS

Les références sont données par l'indication du numéro de la page où se trouve le terme, suivi le cas échéant, des lettres *a* et *b* se rapportant respectivement à la colonne de gauche et à la colonne de droite de chaque page.

Les références sont données, pour les illustrations, par le numéro de la page en caractères gras et, pour le texte, par le numéro de la page en caractères maigres pour une simple citation, et en italique pour un développement plus complet.

Pour les différentes variantes se rattachant à un même terme, un astérisque indiquera le renvoi à ce dernier. *Ex.:*
cellule photovoltaïque
* photopile
photopile (cellule photovoltaïque) **50**

F

G

H

I

J - K

L

M

N - O

P

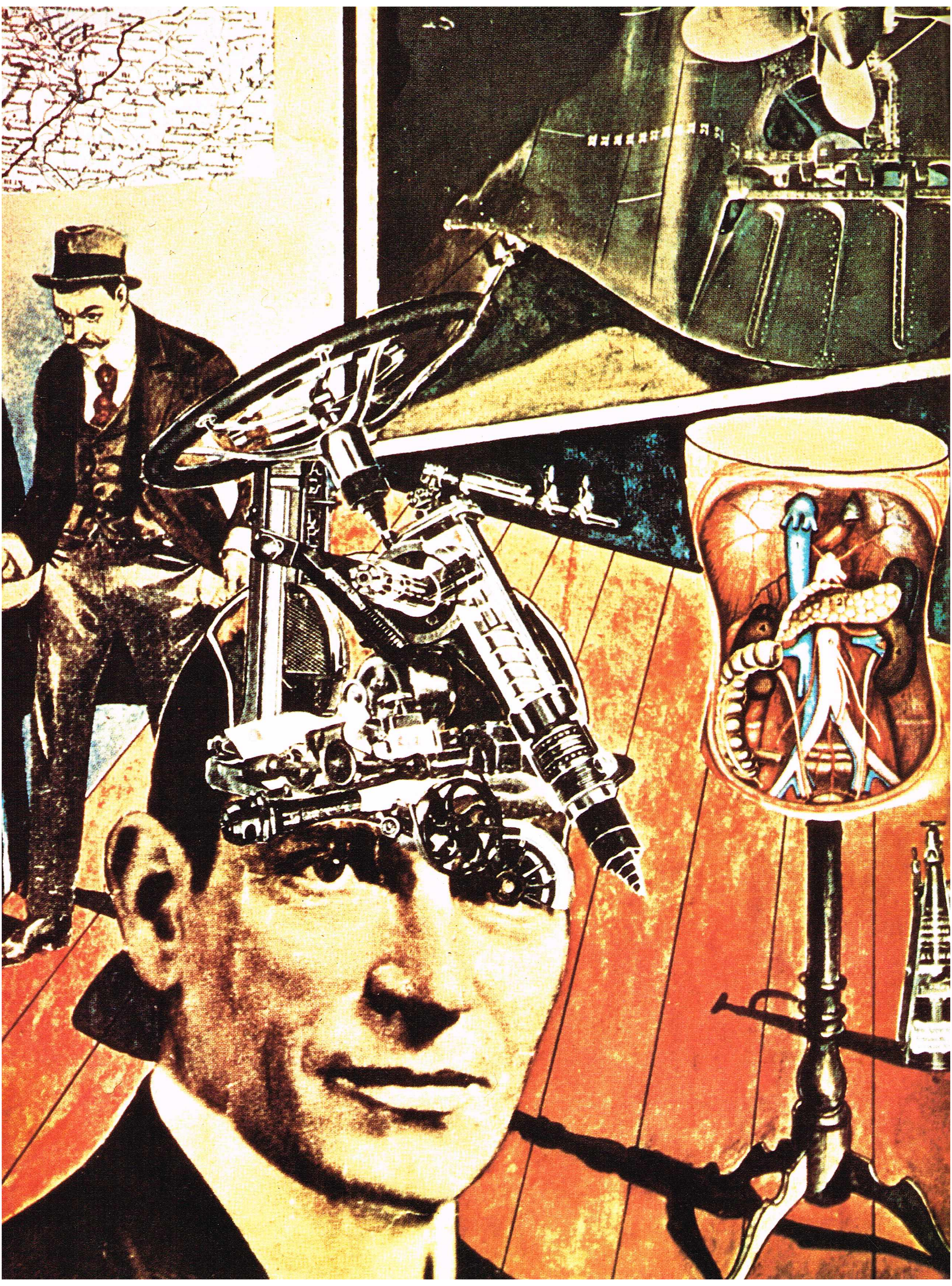
R

Imprimé en Italie

GRANDE ENCYCLOPÉDIE ALPHA DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES

TECHNOLOGIE
I

GRANGE BATELIÈRE, ÉDITIONS ATLAS, PARIS - ÉDITIONS KISTER, GENÈVE
ÉDITIONS ÉRASME, BRUXELLES-ANVERS



Publiée sous le haut patronage de :
Messieurs les professeurs :
Jean DORST, membre de l'Institut,
Charles FEHRENBACH, membre de l'Institut,
Roger HEIM, membre de l'Institut,
Monsieur l'amiral André JUBELIN,
Messieurs les professeurs :
Pierre LÉPINE, membre de l'Institut,
Louis LEPRINCE-RINGUET, de l'Académie française,
Jean-François LEROY, professeur au Muséum national d'histoire naturelle,
Henri NORMANT, membre de l'Institut,
Monsieur Jacques PICCARD, docteur ès sciences h.c.

Réalisation	IDÉES ET ÉDITIONS 16, avenue de Friedland, 75008 Paris.
Comité de direction	Simone DEVAUX, Uberto TOSCO.
Rédaction	Françoise MENU, Monique LIONS-GENTIL, Vanina DORÉ, Marie-Noëlle PAILLETTE.
Recherche de l'illustration	Mathilde RIEUSSEC.
Mise en pages	Tito TOPIN et Serge BROCHE.
Illustrations techniques	Richard COLIN.
Coordinateur des dessins	Mario LOGLI.
Fabrication	Sylvia COLIN, Jocelyne TÉPÉNIER.
Directeur de la publication	B. BOSC.

Les schémas portant la référence Richard Colin
ont été réalisés d'après des croquis fournis par les auteurs.

Dans ce volume :

Moderna Museet, Stockholm

Ont collaboré à ce volume :

pour l'introduction :

G. DENIELOU.

pour l'énergie, physique et historique :

J.-F. CHRÉTIEN, pour l'historique.

P. GAILLARD, pour l'énergie chimique ; l'énergie nucléaire et la physique nucléaire.

B. MICHAUX, pour qu'est-ce que l'énergie ? et pour les unités et la mesure de l'énergie.

pour l'évaluation des ressources énergétiques de la planète :

L. CAIGNAULT, pour les ressources d'origine solaire fossiles, les ressources d'origine mécanique, les ressources en énergie nucléaire, les réserves mondiales.

L. REYNES, pour les ressources d'origine solaire non fossiles et pour la conclusion - Club de Rome.

pour la conversion de l'énergie :

L. REYNES.

pour la transformation de l'énergie :

J. DEBOUT, pour la transformation d'énergie mécanique en énergie mécanique.

J. GUÉNARD, pour la transformation d'énergie électrique en énergie électrique.

L. REYNES, pour la nécessité de la transformation d'énergie.

A. ZOULALIAN, pour la transformation d'énergie thermique en énergie thermique.

pour la distribution de l'énergie :

L. CAIGNAULT, pour la distribution de l'énergie chimique.

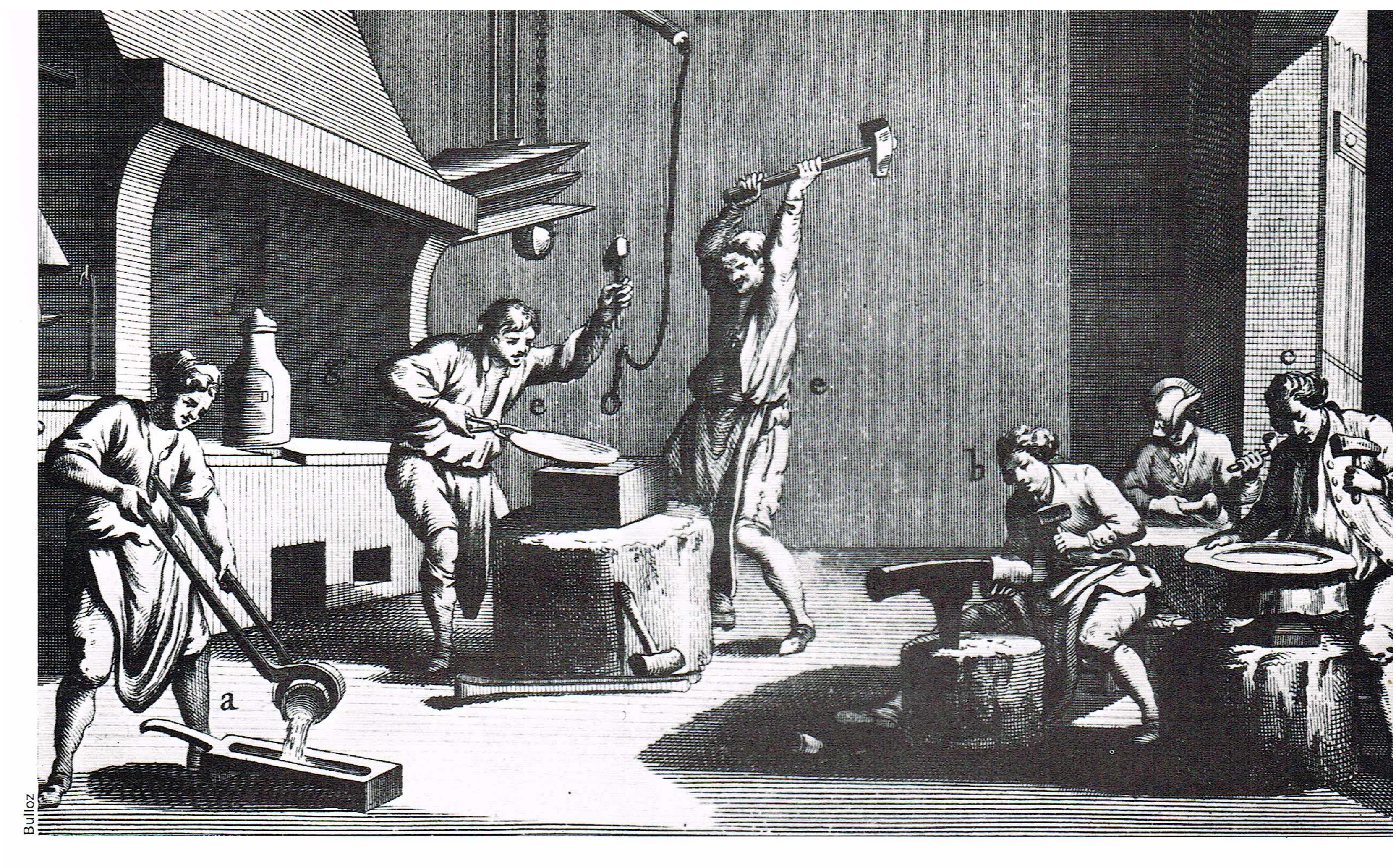
J. GUÉNARD, pour la distribution de l'énergie électrique.

pour le stockage de l'énergie :

L. CAIGNAULT, pour le stockage d'énergie chimique.

J. GUÉNARD, pour le stockage d'énergie électrique.

A. ZOULALIAN, pour le stockage d'énergie thermique.



LA TECHNOLOGIE

Naissance et statut de la technologie

Plus qu'une technique, moins qu'une science : voilà la définition donnée de la technologie par une grande encyclopédie, qui ne fait, en l'occurrence, qu'enregistrer approximativement l'opinion courante, celle de l'homme de la rue. Au rebours, l'université de Compiègne propose « sa » définition officielle de la technologie : « C'est le nom de la science quand elle prend pour objet les produits ou les procédés de l'industrie humaine... »

Alors, la technologie est-elle une science? Au plan strictement grammatical, la définition de Compiègne se tient parfaitement. Nous sommes en face d'une « logie » qui fait nombre avec la psycho-logie, la géo-logie ou l'étho-logie, tous avatars de la science lorsqu'elle applique ses méthodes et son esprit à des objets différents, savoir : l'âme, la Terre ou le comportement.

Certes, tel est le prestige de la connaissance que le suffixe « logie » est parfois utilisé de façon un peu inflationniste. Un Institut universitaire de technologie ferait sans doute mieux de s'intituler plus modestement Institut universitaire de technique. Car il n'y a rien de honteux à enseigner un savoir-faire. Mais pharmacologue fait plus chic que pharmacien, etc.

Que la « techné » puisse être l'objet d'une activité rationnelle, tant au plan de son enseignement que de la recherche, n'est pas une idée neuve. En fait, dès l'aube de la révolution industrielle, nombreux étaient les bons esprits qui en étaient conscients. Comment ne pas évoquer ici les admirables encyclopédistes français, véritables pères fondateurs de la technologie? Comment ne pas évoquer la mémoire de Beckmann qui, à Göttingen, en 1777, a peut-être le premier fait usage du mot même de technologie? A quand une traduction française complète de cet ouvrage : Anleitung zur Technologie und zur Kenntniss der Handwerke, Fabriken und Manufacturen, vornehmlich derer, die mit der Landwirtschaft, Polizey und Cameralwissenschaft in nächster Verbindung stehn, nebst Beyträgen zur Kunstgeschichte. (Introduction à la technologie et à la connaissance des artisanats, des usines et manufactures, de celles en particulier qui sont en étroite liaison avec l'agriculture, la police et l'économie politique; contributions à l'histoire de l'art.)

▲ On peut voir dans l'Encyclopédie de D'Alembert une entreprise prophétique : elle représente en effet la première tentative faite pour familiariser l'homme avec ses procédés et ses produits. Dans la préface, d'Alembert (1717-1783) montre l'esprit humain marchant à la conquête successive de toutes les connaissances et esquisse déjà le progrès des sciences. Ici, une planche de l'Encyclopédie, « Orfèvre grossier ».

Texte de Beckmann (1777)

« La technologie est la science qui enseigne la transformation et le traitement des produits naturels ou la connaissance des métiers. Au lieu qu'on montre seulement, dans les ateliers, comment on doit suivre les instructions et les habitudes du maître pour fabriquer la marchandise, la technologie enseigne d'une manière approfondie et selon un ordre systématique comment trouver les moyens d'atteindre ce but final à partir de principes véritables et d'expériences sûres, et comment expliquer et tirer parti des phénomènes qui apparaissent pendant le traitement. »

La technologie : Ampère

Pour approprier les corps aux divers usages auxquels ils sont destinés, il faut leur faire subir diverses transformations ; par exemple, changer successivement la laine en fils, en draps, en habits ; un lingot d'acier en ressorts, en instruments tranchants ; les substances alimentaires en mets qui puissent flatter notre goût ; un sable grossier en verre et en cristaux, etc. ; il faut les transporter des lieux où ils sont en abondance dans ceux où la consommation les réclame, les conserver jusqu'au moment de les livrer au consommateur. Des instruments et des machines sont nécessaires pour opérer ces transformations. Or la connaissance des procédés par lesquels on les opère, des instruments ou des machines qu'on y emploie, constitue une science du troisième ordre, que j'appelle *technographie*, de τεχνη, *art*.

Cerdoristique industrielle. Il ne suffit pas de connaître les procédés, les machines, tous les instruments employés dans les arts ; il faut encore qu'on sache se rendre compte des profits et des pertes d'une entreprise en activité et prévoir ce qu'on peut attendre d'une entreprise à tenter.

Pour cela il faut calculer exactement, dans les deux cas, les mises de fonds nécessaires soit pour les locaux et appareils convenables, soit pour l'achat des matières premières et la main-d'œuvre ; il faut apprendre à connaître les qualités diverses et les prix relatifs de ces matières premières, celui qu'elles acquièrent par les transformations qu'on leur a fait subir. Mille autres circonstances analogues doivent être prises en considération, et de toutes les recherches de ce genre se compose une science du troisième ordre, à laquelle je donne le nom de *cerdoristique industrielle*, de κερδοζ, *gain, profit*, οριζω, *je détermine*. A cette science appartient évidemment l'*art de tenir les livres*, au moyen duquel un industriel peut à tout instant se rendre compte de ses profits ou de ses pertes.

Économie industrielle. Tant que, dans l'étude des procédés des arts, l'homme se borne à ces deux sciences du troisième ordre, il n'apprend qu'à répéter ce qu'on fait dans le lieu qu'il habite, il reste sous le joug de la routine. Pour que l'industrie puisse faire des progrès, il est nécessaire de comparer les procédés, les instruments, les machines, etc., usités en différents temps et en différents lieux. Cette comparaison peut se faire de deux manières : la première consiste à comparer les résultats qu'ils donnent, tant sous le rapport de la perfection des produits obtenus que sous celui des frais qu'exigent l'emploi de ces procédés ou de ces instruments, la construction de ces machines, etc., pour juger quels sont les plus avantageux et en déduire des lois générales qui puissent diriger dans une entreprise industrielle. C'est par des comparaisons de cette espèce qu'on a découvert et démontré, par exemple, les avantages de la division du travail pour obtenir les produits les plus économiques, c'est-à-dire réunissant les conditions les plus favorables au producteur et au consommateur. C'est à cette science que je donne le nom d'*économie industrielle*.

Physique industrielle. Par ce mode de comparaison, purement empirique, il faudrait souvent faire beaucoup de dépenses en essais de procédés, en constructions d'instruments ou de machines, pour n'arriver qu'à des résultats qui tromperaient les espérances qu'on aurait conçues. Il est un autre mode de comparaison, qui consiste à s'aider des connaissances de physique générale acquises précédemment, à étudier les phénomènes qui se passent dans les transformations que les arts font subir aux corps, à remonter à leurs causes, à prévoir ainsi les résultats qu'on peut attendre des nouveaux procédés et des nouvelles machines, avant d'en faire l'essai. Cette application de la théorie à la pratique a un autre avantage : la connaissance des causes peut seule conduire à perfectionner les procédés connus, à en inventer de nouveaux, et à faire également prévoir dans ces deux cas le succès qu'on peut espérer. Tel est l'objet de la *physique industrielle*. C'est à cette science que la plupart des arts doivent leurs progrès et les perfectionnements qu'ils ont atteints. Ainsi, par exemple, depuis des siècles, on blanchissait les toiles en les exposant à l'air et à la rosée. L'illustre Berthollet chercha la cause de ce phénomène ; il découvrit que c'est l'oxygène de l'atmosphère qui brûle et détruit la matière colorante ; il remplaça cet oxygène de l'air par celui que le chlore dégage de l'eau et parvint à décolorer en quelques instants ces mêmes toiles dont le blanchiment, par les procédés ordinaires, aurait exigé plusieurs mois.

Classification

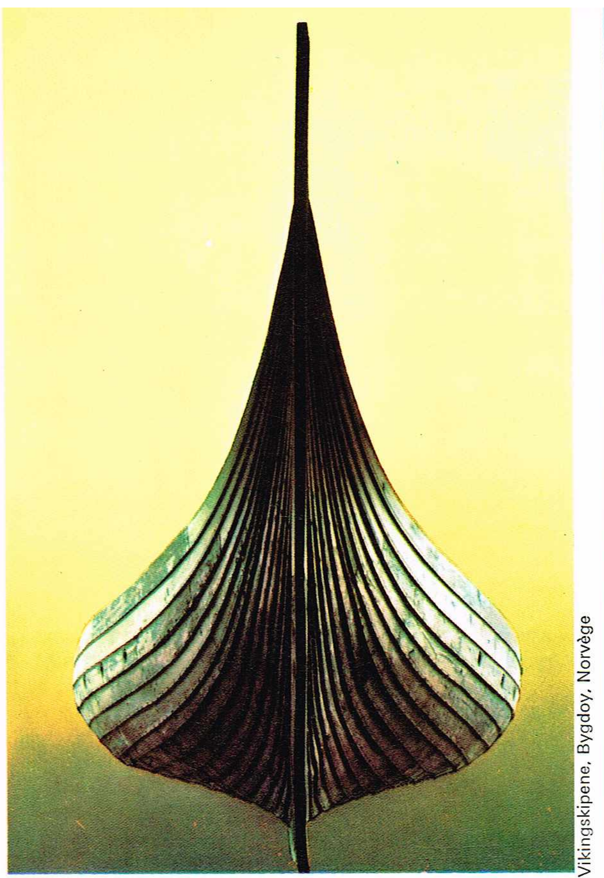
Ces quatre sciences embrassent tout ce qu'il nous est donné de connaître relativement à leur objet spécial, les procédés par lesquels nous transformons les corps pour les approprier à nos besoins ou à nos jouissances. J'en composerai une science du premier ordre, la TECHNOLOGIE. Dans les deux premières, on n'emploie que des procédés usités, et je donnerai à leur réunion le nom de TECHNOLOGIE ÉLÉMENTAIRE ; les deux autres ont un autre but : on y compare tous les procédés qui peuvent être employés, pour choisir les plus avantageux ; seulement, dans la première, cette comparaison est fondée uniquement sur les résultats obtenus, et dans la seconde, sur ceux que la théorie nous fait prévoir. C'est pourquoi je désignerai sous le nom de TECHNOLOGIE COMPARÉE la réunion de ces deux sciences du troisième ordre. L'analogie m'avait d'abord porté à donner à cette science du second ordre, qui en résulte, le nom de *technognosie ;* mais cette expression déduite de γνωσιζ, *connaissance*, ne m'a pas semblé devoir s'appliquer à une science où l'on n'étudie pas les corps pour les *connaître*, mais pour en retirer l'utilité qu'ils peuvent nous procurer. Les deux sciences du troisième ordre qui y sont comprises, ayant également pour objet de choisir entre les différents procédés qu'on peut suivre pour atteindre un même but, supposent toutes deux la comparaison de ces divers procédés, et c'est pour cela que l'expression de technologie comparée convient à la science du second ordre qui les réunit.

Le tableau suivant représente les divisions de la technologie.

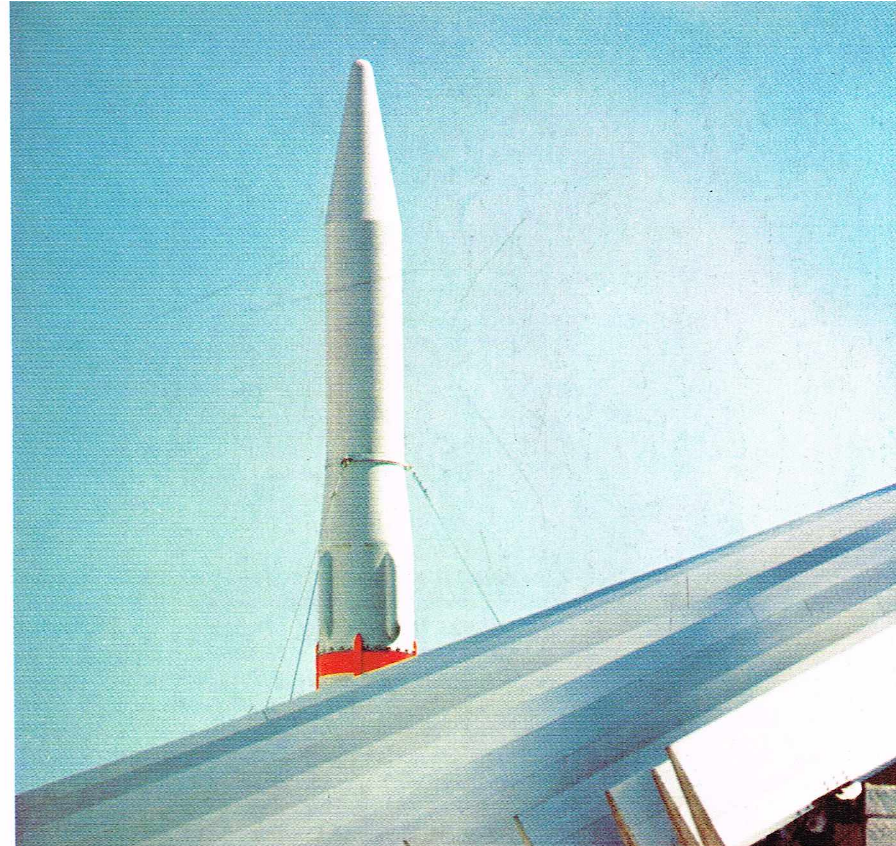
Science du 1er ordre	*Sciences du 2e ordre*	*Sciences du 3e ordre*
	TECHNOLOGIE ÉLÉMENTAIRE	Technographie Cerdoristique industrielle
TECHNOLOGIE		
	TECHNOLOGIE COMPARÉE	Économie industrielle Physique industrielle

Nous serions coupables aussi de priver les lecteurs de cette collection des réflexions si profondes et si élaborées du génial Ampère qui, avec raison, faisait de la technologie une science de premier ordre, même si sa « cerdoristique » a été quelque peu oubliée...

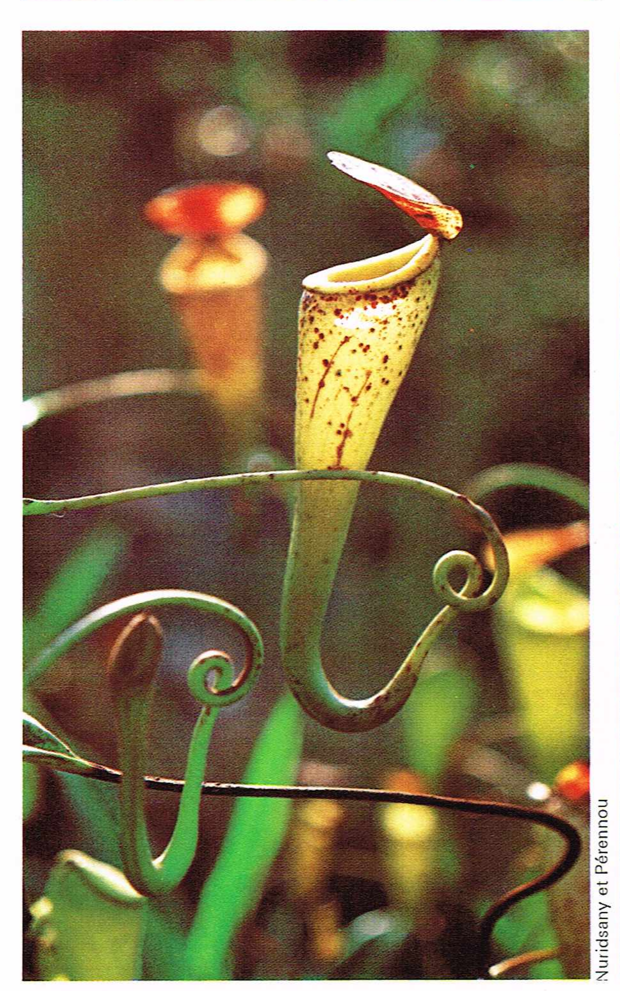
Ainsi l'histoire des idées rencontre-t-elle l'étymologie pour reconnaître le droit de la technologie à sa place dans la classification des sciences. Il faut bien dire que ce droit n'est pas aisément admis par tous. Pour un François Jacob qui n'hésite pas à dire : « La biologie n'est que la technologie du vivant (comme la technologie est la biologie des machines) », combien de bons esprits sont encore prisonniers de la vieille idée de science « appliquée », et oublient le solennel avertissement de Pasteur : Ne séparez jamais la science de ses applications. *Bien sûr, comme la biologie, la techno-*



Vikingskipene, Bygdoy, Norvège



R. Burri - Magnum



Nuridsany et Pérennou



R. Burri - Magnum

▲ **Pureté de la ligne :** *la pureté de la ligne manifeste l'existence de lois simples et rend l'objet signifiant, intelligible et fonctionnel. Les mécanismes mis en jeu pour aboutir sont pourtant différents.*

En haut à gauche, le bateau des Vikings : l'Océan et la mort ont fait de la fibre un polynôme, non la raison.
A droite, la fusée Diamant *: fruit d'un travail d'équipe et d'investissements importants.*
Ci-dessus, à gauche, la nature : plante décorative et fonctionnelle (carnivore).
Les sucs digestifs contenus au fond de l'urne sont protégés de la pluie, qui les diluerait, par un couvercle incliné faisant office de toit.
A droite, les caryatides de l'Érechthéion (Athènes). Il n'est pas jusqu'à l'architecte qui ne puisse dire : « Mon temple fonctionne. »

logie est une science coincée, *qui doit se battre pour faire admettre sa spécificité : la science du vivant est en relation conflictuelle avec, sur sa gauche, la physique et la chimie ; sur sa droite, la médecine et l'agriculture. Les tentatives réductionnistes ne manquent pas, qui caressent l'espoir d'enlever toute pertinence aux concepts propres de la biologie. Au rebours, ils ne sont pas rares ceux qui, au fond d'eux-mêmes, doutent profondément que l'activité des biologistes puisse atteindre au mystère de la personne.*

Eh bien ! il en est de même pour la technologie : elle aussi, pressée entre ce qu'Ampère appelle la physique industrielle, d'une part, et, d'autre part, l'industrie ou l'agriculture. Combien cherchent à ramener la locomotive à vapeur soit à la thermodynamique, soit aux lois économiques du marché ? Oubliant qu'une locomotive qui marche ne doit quasiment rien ni à Carnot ni à Marx (ou Keynes ou tout autre).

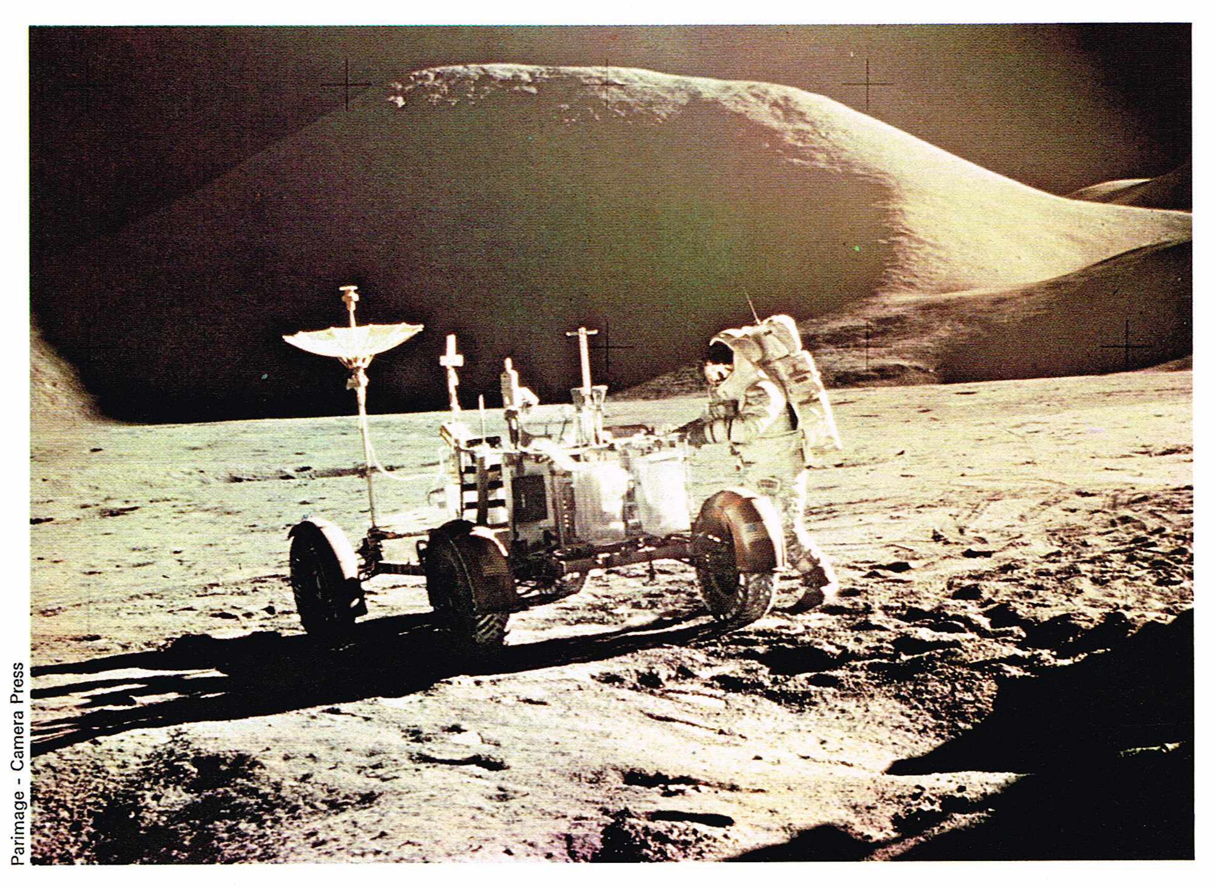
C'est que, comme il arrive souvent, c'est la technologie appliquée *qui a lancé la technologie tout court. Nous avons tout à l'heure évoqué Pasteur. Chacun sait que la conserve — voire la « pasteurisation » — étaient antérieures à Pasteur. Les admirables succès de la technique humaine n'ont pas attendu les penseurs de cette technique. En fait, ils les ont précédés.*

Considérez ce vaisseau des Vikings. Comment ne pas y voir une mathématique flottante ? Ne paraît-il pas dessiné par un ordinateur ? Chacune de ses lisses, chacun de ses couples semble obéir à quelque loi algébrique simple. Le polynôme se cache sous la fibre. Et sans doute est-ce vrai ? Mais que le lecteur veuille bien imaginer un instant la vie — et la mort — de tous ces grands marins du Nord ? Combien sont-ils qui, selon le mot du poète, « Dans le sombre Océan se sont évanouis » ? Seuls ont été copiés — et améliorés — les bateaux qui sont revenus à bon port. Un dur processus de sélection naturelle a fait ces merveilles, enfants de l'Océan et de la mort, plus que de la raison. Le temps, jouant sur le double registre du hasard et de la nécessité, a engendré ces lignes aussi pures que celles de la coquille ou celles du temple.

Au rebours, considérez un instant l'opération Apollo. *Le temps était fixé. L'échec inacceptable. La raison seule pouvait affronter le double défi du planning et de la sûreté pour engendrer aussi des formes pures. La technologie obtenait sur la Lune ses lettres de noblesse.*

La distance physique et les conditions extrêmes du cosmos engendrent une distance intellectuelle entre l'homme et ses produits. Après les premiers pas d'Anderson sur la Lune, on ne peut plus regarder une brouette comme avant. *Et la « retombée » principale d'une entreprise à bien des égards absurde est justement de l'ordre du quotidien. Voici que nos produits, voici que nos procédés nous apparaissent comme pensables, encore que — jusqu'ici — impensés. Il ne s'agit pas là d'une simple réflexion philosophique. Imaginez la situation d'un ingénieur du projet* Apollo *qui, une fois le succès de la* N. A. S. A. *assuré, trouve un emploi dans une entreprise de chauffage central (ou d'engrais, ou de machines-outils...). Il est accoutumé à une analyse des problèmes parfaitement cartésienne. Il remet nécessairement en cause les habitudes (séculaires) de la profession. Des conflits sont probables — mais sans doute fructueux.* Une vue radicalement nouvelle de la technique *s'impose peu à peu.*

En allant sur la Lune, l'homme ne s'est pas rapproché des étoiles : il s'est éloigné de ses produits. Il s'est éloigné de lui-même. Il était temps.



Parimage - Camera Press

▶ Alors qu'il a fallu des centaines d'années pour aboutir à la perfection d'un bateau comme celui des Vikings, quelques années seulement ont abouti au résultat immédiat et sans échec possible : la voiture lunaire.



Ernst Haas - Magnum

Le règne machinal et la technosphère

Ainsi donc, si la technologie a bien le statut d'une science fondamentale, il nous faut reconnaître qu'elle n'existe encore guère. Nous serions bien en peine de citer le nom de quelques grands technologues, au moins de purs technologues.

L'immense complexité des produits de l'industrie humaine avec ses genres, ses espèces, ses familles, ses variétés n'est même pas encore classée. La technologie attend son Linné. Cependant, les rapprochements entre les êtres biologiques et les objets ou les machines ne manquent pas. Pris individuellement, ils peuvent paraître superficiels; pris collectivement, ils deviennent impressionnants. A la patte répond la roue; à l'oiseau, l'avion; au cerveau, l'ordinateur; au système nerveux, tous les câblages; aux systèmes digestif et circulatoire, toutes les tuyauteries. Croyez-vous que ce soit par hasard

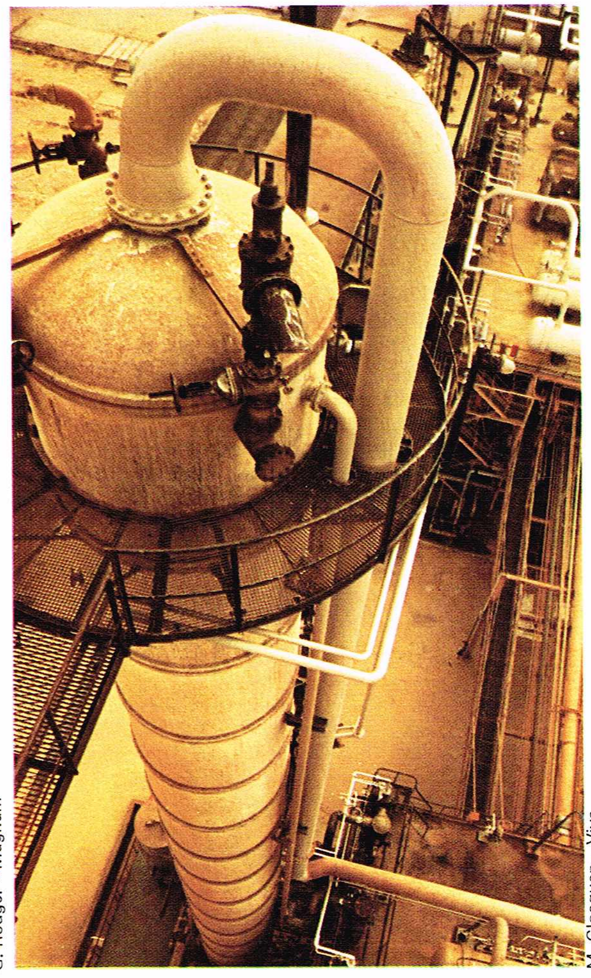


De Andrade - Magnum

Snark International

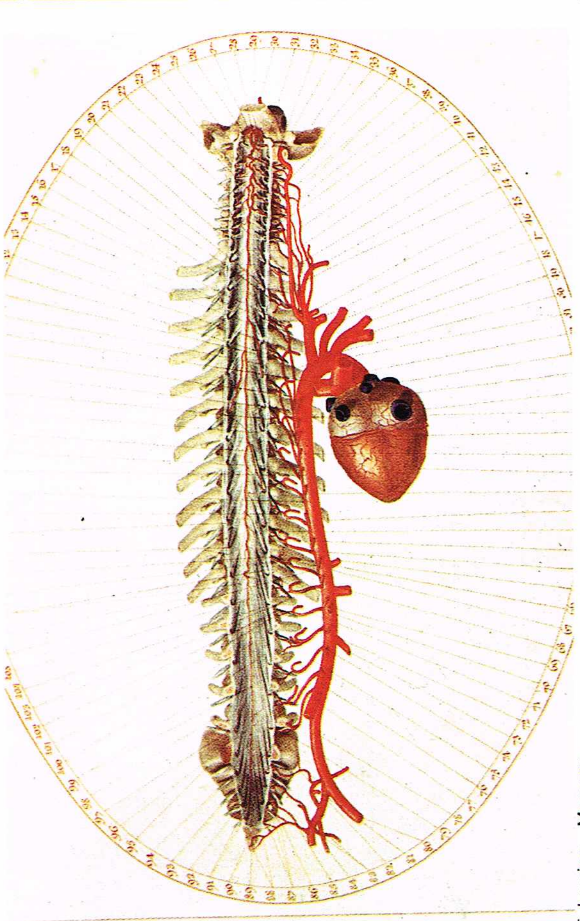
▲◀ *L'avion n'est pas la copie de l'oiseau; ceux qui ont essayé dans cette voie ont échoué. Sa ressemblance avec lui n'en est que plus troublante.*

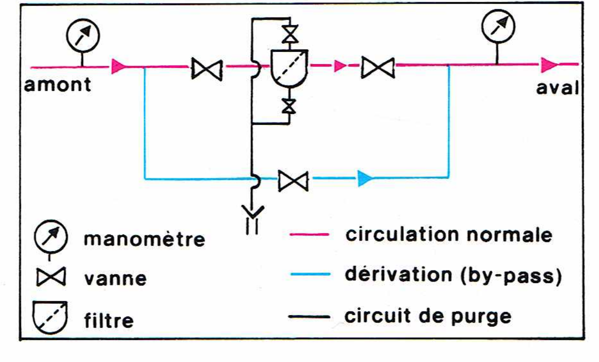

G. Rodger - Magnum


M. Gloaguen - Viva

▲▶ *Qu'il s'agisse de charpente ou de tuyauterie (ci-dessus), les possibilités ne sont pas infinies. Toutes les formes ne sont pas possibles.* La biologie *(ci-contre, à gauche)* est la technologie du vivant.

▶ *Ci-contre, à droite, en technologie, la signification, c'est le fonctionnement. La locution* filtre *est décomposable en éléments organisés ; elle peut être à son tour un élément simple d'un ensemble de niveau supérieur (centrale, etc.).*


E. Lessing - Magnum



que l'on parle de l'alimentation d'un moteur ? De la même façon, à l'anatomie répond le descriptif des machines ; à la physiologie, leur fonctionnement.

Certes, les machines n'ont ni sexe ni famille. Elles ont cependant des générations. La différence profonde avec les êtres vivants est que leur organisation n'est pas cellulaire et que leur capital génétique est extérieur à la machine. On retrouve bien à l'intérieur des portes d'une armoire électrique le schéma de câblage de cette armoire : on n'y retrouve pas la totalité des plans de fabrication. De la même façon, les instructions de fonctionnement sont pour leur plus grande partie obtenues dans des documents — dont la nature est d'ailleurs proche des documents nécessaires à la construction ou au montage.

Le capital génétique externe est caractéristique du règne machinal. Il n'est pas interdit, au moins à titre d'excitation de notre imagina-

tion, de penser l'homme lui-même comme le chromosome de ses machines. *Il est vrai que, bien souvent, le dynamisme interne de la croissance des machines et de leur développement paraît davantage obéir à ses lois propres qu'à la volonté de l'homme. Ainsi la technologie, comme discours rationnel sur les produits de l'homme, commence-t-elle par relativiser le rôle même de l'homme rationnel.*

Il y a plus : lorsque l'on compare une automobile japonaise à une automobile américaine ou européenne, il est difficile de ne pas être frappé à la fois par leur similitude et par leur différence. Comment ne pas évoquer les similitudes et les différences entre l'écureuil américain et l'écureuil européen ? Visiblement, les objets et les machines ne sont pas indépendants entre eux. C'est la charge par essieu des gros camions qui va parfois déterminer la taille ou la forme d'un réacteur nucléaire par le biais des limitations de transport de tel ou tel de leurs auxiliaires. Machines et objets ont une écologie. *Chaque produit est déterminé, mais ce n'est pas seulement par les lois du marché, comme un économisme abusif veut nous le faire croire. En fait, la nouvelle machine s'insère dans une véritable niche écologique. Elle se développe et meurt comme une espèce.*

On n'en finirait pas de méditer sur les profondes analogies entre le règne machinal et le règne vivant. Mais la technologie entretient des rapports avec tant d'autres sciences !

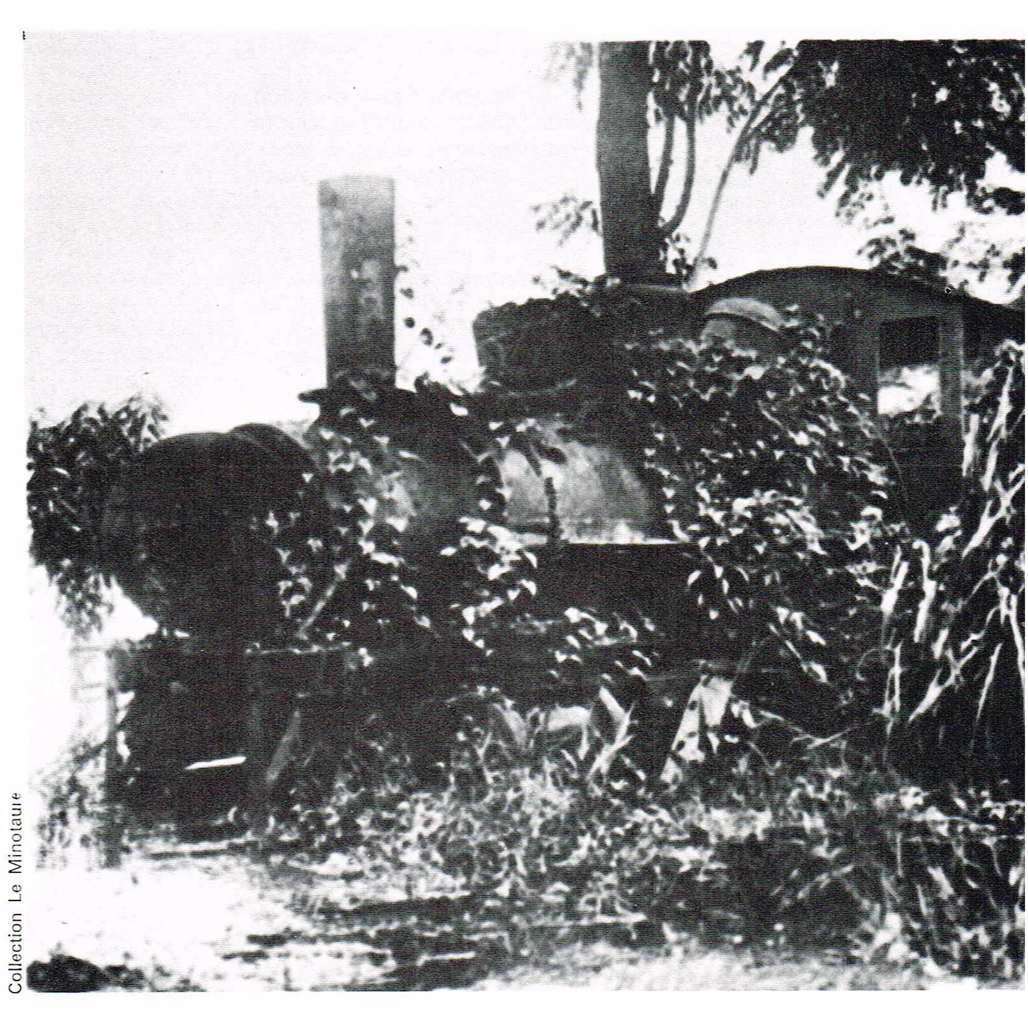
La linguistique est peut-être le cas le plus évident. Pour celui qui a fréquenté les machines, celles-ci apparaissent comme de véritables discours dont la signification serait le fonctionnement. Les éléments des machines ont une existence autonome comme les mots, et, cependant, sont regroupés en sous-ensembles comme des phrases. Il y a une grammaire technique comme il y a une syntaxe et une stylistique technologiques. Considérez, par exemple, un filtre dans une installation industrielle ; assez généralement, ce filtre, devant être visité, sera pourvu d'une vanne amont et d'une vanne aval. Un by-pass permettra à l'installation de fonctionner même lorsque le filtre est bouché ou démonté. Un manomètre indiquera la pression amont, la pression aval. Une purge permettra de le vider. Parfois, une soupape de sûreté viendra le protéger. L'ensemble de tous ces mots formera une locution « filtre » à la fois aussi complexe et aussi simple qu'une expression comme « n'est-ce pas », ou « dorénavant ». Les fautes de construction ou de conception ressemblent beaucoup aux fautes de grammaire. Souvent, elles n'empêcheront pas le fonctionnement (la signification) ; parfois, au contraire, elles entraîneront l'impossibilité complète de fonctionnement (le contresens).

A des niveaux de structure plus élevés, un bon ingénieur est capable de reconnaître une machine anglaise d'une machine allemande, même lorsque les plaques signalétiques ont été démontées.

Alors, qu'est-ce qui détermine la forme des machines ou des objets ? Telle est sans doute la première et la plus fondamentale des questions de la technologie. Il n'est évidemment pas dans notre intention d'y répondre ici, mais seulement de montrer la complexité du problème.

Interviennent nécessairement dans la réponse :

— Les lois physiques : tout le monde comprend que l'avion « dépend » de la gravité ou de l'aérodynamique.



Collection Le Minotaure

▲ Les machines meurent aussi... Illustration extraite de **Minotaure** ***n° 10, 1937.***



Roger Viollet

◀ Fer à vapeur, 1919. Plus qu'un outil, déjà une une machine, mais compagnon paisible et familier.

▶ ***Descartes :* le Discours de la méthode, *1637.***

— L'homme lui-même est à de nombreux titres :

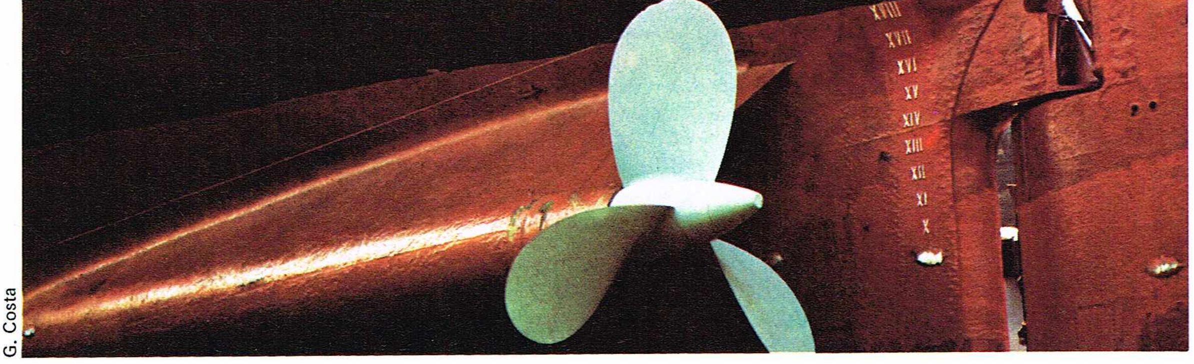
- *utilisateur sans doute : les poignées sont faites non seulement par la main de l'homme mais pour la main de l'homme ;*
- *constructeur, ouvrier ;*
- *mais plus profondément encore concepteur. Et c'est sans doute là que les analogies biologiques évoquées plus haut ne conviennent plus. Les machines sont, avant tout,* pensables. *Leur structure reproduit dans l'acier, le bois ou le plastique une structure de notre esprit. Même si nous savions le construire, il est probable que nous n'aurions jamais pu* concevoir *un œil. Aussi une des voies les plus prometteuses de la technologie est-elle l'étude fine de la psychologie professionnelle de l'ingénieur concepteur.*

— Les autres machines, comme nous l'avons indiqué, dans le cadre à la fois d'une écologie et d'une génétique, d'une histoire peut-être.

Texte de Descartes (1637)

Je m'avisai de considérer que souvent il n'y a pas tant de perfection dans les ouvrages composés de plusieurs pièces, et faits de la main de divers maîtres, qu'en ceux auxquels un seul a travaillé. Ainsi voit-on que les bâtiments qu'un seul architecte a entrepris et achevés ont coutume d'être plus beaux et mieux ordonnés que ceux que plusieurs ont tâché de raccommoder en faisant servir de vieilles murailles qui avaient été bâties à d'autres fins. Ainsi ces anciennes cités qui, n'ayant été au commencement que des bourgades, sont devenues par succession de temps de grandes villes, sont ordinairement si mal compassées, au prix de ces places régulières qu'un ingénieur trace à sa fantaisie dans une plaine, qu'encore que, considérant leurs édifices chacun à part, on y trouve souvent autant ou plus d'art qu'en ceux des autres, toutefois, à voir comme ils sont arrangés, ici un grand, là un petit, et comme ils rendent les rues courbées et inégales, on dirait plutôt que c'est la fortune que la volonté de quelques hommes usant de raison qui les a ainsi disposés.


Claude Nuridsany



G. Costa

▶ ***Fruit d'érable (en haut) : chaque graine est dotée d'une large aile-membrane, légèrement hélicoïdale, qui agit comme la pale d'une hélice (en bas) et favorise la dissémination au loin.***

1876 : le tour de France par deux enfants

XXIII. — Les moyens que l'homme emploie pour mettre en mouvement ses machines. — Un ouvrier inventeur.

La prétendue baguette des fées était moins puissante que ne l'est aujourd'hui la science des hommes.

Julien avait écouté de toutes ses oreilles le récit d'André.

— Mais pourtant, dit-il, ces machines ne peuvent pas aller toutes seules. Bien sûr, il y avait quelque part des ouvriers que tu n'as pas vus, et qui les mettaient en mouvement, comme le rémouleur quand il fait tourner sa roue de toutes ses forces.

— Je t'assure, Julien, qu'il n'y avait pas d'ouvriers à remuer les machines, et cependant elles ne s'arrêtaient pas une minute.

— Alors, dit la mère Gertrude gaîment, cela ressemblait à un conte de fée

Cent ans plus tard : Histoire de France

L'agitation, le bruit entraînent surmenage nerveux et maladies graves. Il n'y a jamais eu autant de maladies nerveuses et mentales, de maladies du cœur et des vaisseaux et (quoi qu'on en dise) jamais autant de cancers.

Le progrès des sciences et des techniques a permis de vaincre certaines misères et certaines maladies. Il en a fait naître ou répandre bien d'autres. Les pouvoirs publics, jusqu'ici, interviennent peu. Cependant *le danger est grave, de plus en plus grave*. Chacun d'entre nous doit et peut s'appliquer à le dénoncer, à le combattre, à le conjurer.

◀ ***En haut, extrait d'un manuel d'enseignement en 1876 :* le Tour de la France par deux enfants, *G. Bruno, Édition du centenaire, Belin, 197‑ ; en bas, extrait d'un manuel en 1976,* Histoire de France, *M. et C. Chaubanges, Delagrave. Le progrès, d'abord conte de fées, voici qu'on le présente maintenant comme un cauchemar.***

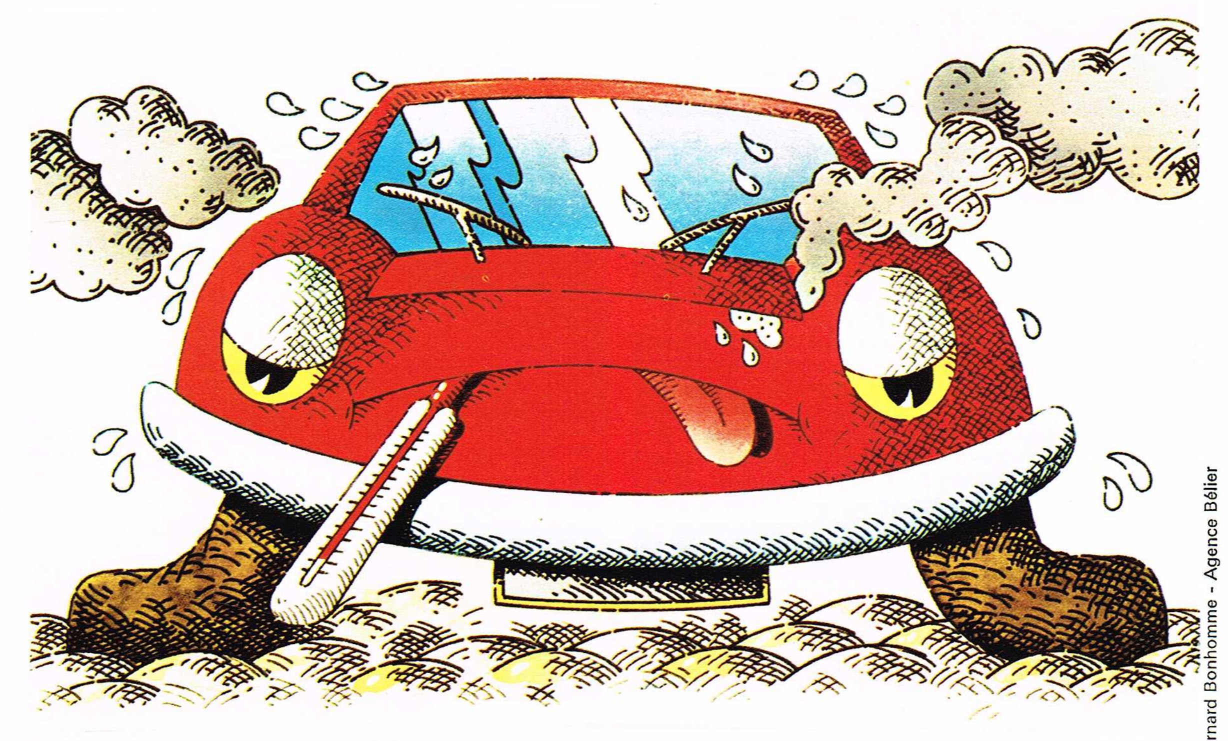
— L'économie, bien sûr, quoique à un degré sans doute moindre que le public ne le croit.

— Enfin sans doute des lois propres à toute morphogenèse. *Car, dans l'évolution des formes, on rencontre inévitablement un mélange de continu et de discontinu. Si on trouve en effet des moteurs à explosion plus ou moins gros, plus ou moins longs, des cylindres plus ou moins « carrés », on ne saurait passer* de façon continue *de ce moteur à la turbine à gaz ou au moteur Wenkel. Aussi, donc, si le nombre de moteurs de propulsion possibles fonctionnant aux hydrocarbures est évidemment infini, qu'en est-il des types de solutions possibles? Comment en aborder l'inventaire? Est-il possible de passer du* brain storming *ou de la « créativité » à une systématique raisonnable de l'invention? La création en matière de technique restera-t-elle toujours une forme d'art?*

Technologie et politique

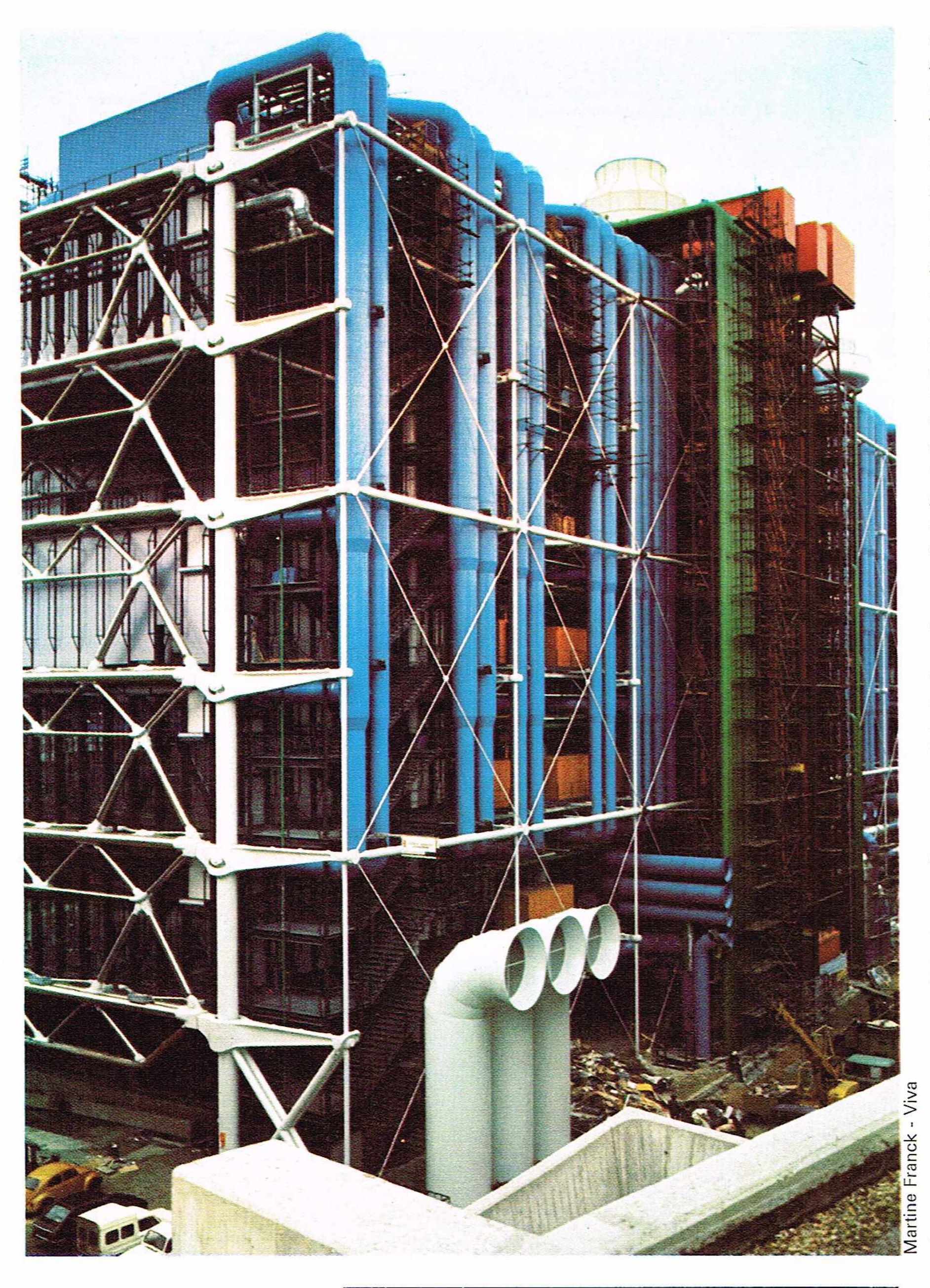
L'absence d'une technologie ou tout au moins le retard de son développement par rapport aux autres sciences est le signe le plus manifeste que l'homme n'a pas encore maîtrisé ses propres produits, qu'il ne domine pas sa croissance.

Quel que soit le jugement que l'on puisse porter sur l'organisation politique de l'Antiquité ou du Moyen Age, il semble bien que la compétence de tous en matière de vie quotidienne était plus considérable qu'aujourd'hui. Lorsque l'on discutait d'un droit de chasse, de la construction éventuelle d'un pont, d'une plantation de luzerne, tout le monde savait de quoi il s'agissait. Même si tout le monde n'avait pas son mot à dire, tout au moins avait-on une opinion. Aujourd'hui, lorsqu'il s'agit d'implanter un train à grande vitesse entre Paris et Lyon ou



Bernard Bonhomme - Agence Bélier

◀ ***Il se crée des liens affectifs entre l'homme et la voiture au point qu'il lui donne figure humaine et s'inquiète de la voir souffrir. Ici, une annonce publicitaire conçue par l'agence Bélier :* « Quand j'ai des vapeurs, j'appelle Touring Secours. »**


Martine Franck - Viva

une centrale nucléaire à Ploudalmézeau, en fait, le citoyen n'est pas en mesure d'apprécier les conséquences de la décision, que ce soit pour l'assumer ou la contester. Cette incompétence est d'ailleurs celle de ses élus qui ne sont pas plus éduqués que lui en la matière. Voilà, direz-vous, le procès classique de la technocratie. Sans doute, mais ce procès n'est pas exactement celui que l'on croit : on range en effet sous le nom de technocrates deux catégories de personnes bien différentes. Celles qui, n'ayant pas la compétence, sont amenées par le pouvoir qui leur a été conféré à décider de ce qu'elles ignorent. Et d'autre part, celles qui, par leur compétence technique, sont amenées à usurper un pouvoir qu'elles n'ont pas démocratiquement reçu. En fait, l'existence de ces deux catégories de personnes traduit simplement le décalage profond qui s'est opéré entre l'éducation que nous recevons, notre culture et le monde dans lequel nous vivons. L'absence d'une véritable éducation technologique, d'un humanisme des machines, est le fondement de la technocratie. Il est tout à fait vain d'essayer de multiplier les contrôles et les consultations, si, dès l'école, on ne crée pas une familiarité plus grande entre l'homme et ses produits. On peut dire sans hésiter que la technocratie est l'état politique d'un pays où l'éducation technologique est insuffisante. Nous disions plus haut que la technologie n'avait pas encore trouvé son Linné. Elle n'a pas encore eu son Virgile non plus, et les Géorgiques techniques sont toujours à écrire. De ce point de vue, une entreprise comme la présente Encyclopédie est certainement une œuvre de salut politique.

Mais il faut aller plus loin. Sur un globe où le poids de l'homme l'emporte de plus en plus sur celui de la nature, la compréhension générale des choses passe de plus en plus par l'intelligibilité de ses produits. Jadis, le mystère était dans l'arc-en-ciel, dans la grêle ou dans les étoiles. Les « météores » étaient étranges. On peut se demander si aujourd'hui ce ne sont pas nos automobiles, nos ordinateurs, qui nous sont étranges. Des mouvements antiprogressistes, antiscience, voire millénaristes, nous menacent justement en raison du retard pris par la technologie sur la technique et sur l'industrie. Qu'on le veuille ou non, le monde de l'industrie reste encore une sous-culture, et son langage n'a pas encore envahi le langage quotidien. Imaginez-vous un homme parlant de sa femme et s'écriant « Elle a une drôle de fonction de transfert ! » Pourtant, une telle image n'aurait rien que de très naturel, mais l'imperméabilité de deux mondes la rend parfaitement absurde. Un peu comme ce cours du théologien Harvey Cox sur « la Vierge et la dynamo » : le rapprochement cocasse des deux noms avait sans doute pour but de nous faire méditer sur cette dichotomie de notre culture. Peut-être faudrait-il oser parler ici des religions et des techniques ? L'embarras des théologiens devant les objets ou les usines est flagrant. Ils n'étaient pas si embarrassés avec les animaux. La Genèse leur fournissait des images tout à fait rassurantes. Saint François d'Assise prêchait les oiseaux. S'il revenait aujourd'hui, peut-être prêcherait-il les machines.

GUY DENIELOU.

▲ On peut voir dans le centre Georges Pompidou une tentative de synthèse et de réunification entre la technologie et la culture. Ce n'est sans doute pas par hasard que cet aspect de raffinerie a été attribué à un centre culturel ; las d'être divisé entre culture et industrie, l'homme cherche à retrouver l'unité de l'esprit.

L'université de technologie de Compiègne

Créée en 1972, l'université de technologie de Compiègne (U.T.C.) est la première en France qui ait pour dominante la technologie. Sa naissance visait à combler le vide subsistant dans l'enseignement supérieur après l'introduction de la technologie dans le secondaire et l'ouverture d'instituts spécialisés ne couvrant que le premier cycle : les I.U.T.

Université au recrutement national, l'U.T.C. est essentiellement une école d'ingénieurs qui prépare au diplôme dans les trois domaines du génie biologique, du génie chimique et du génie mécanique. Ses enseignements de troisième cycle soutiennent la recherche qui prend également pour thème la technologie dans l'acception la plus générale du terme.

L'U.T.C. doit à son caractère expérimental quelques particularités : conseil comprenant des membres représentant l'industrie et les grandes administrations, nommés par le secrétariat d'État, admission non automatique des étudiants après le baccalauréat, alternance entre les études universitaires et les périodes de travail en milieu professionnel...

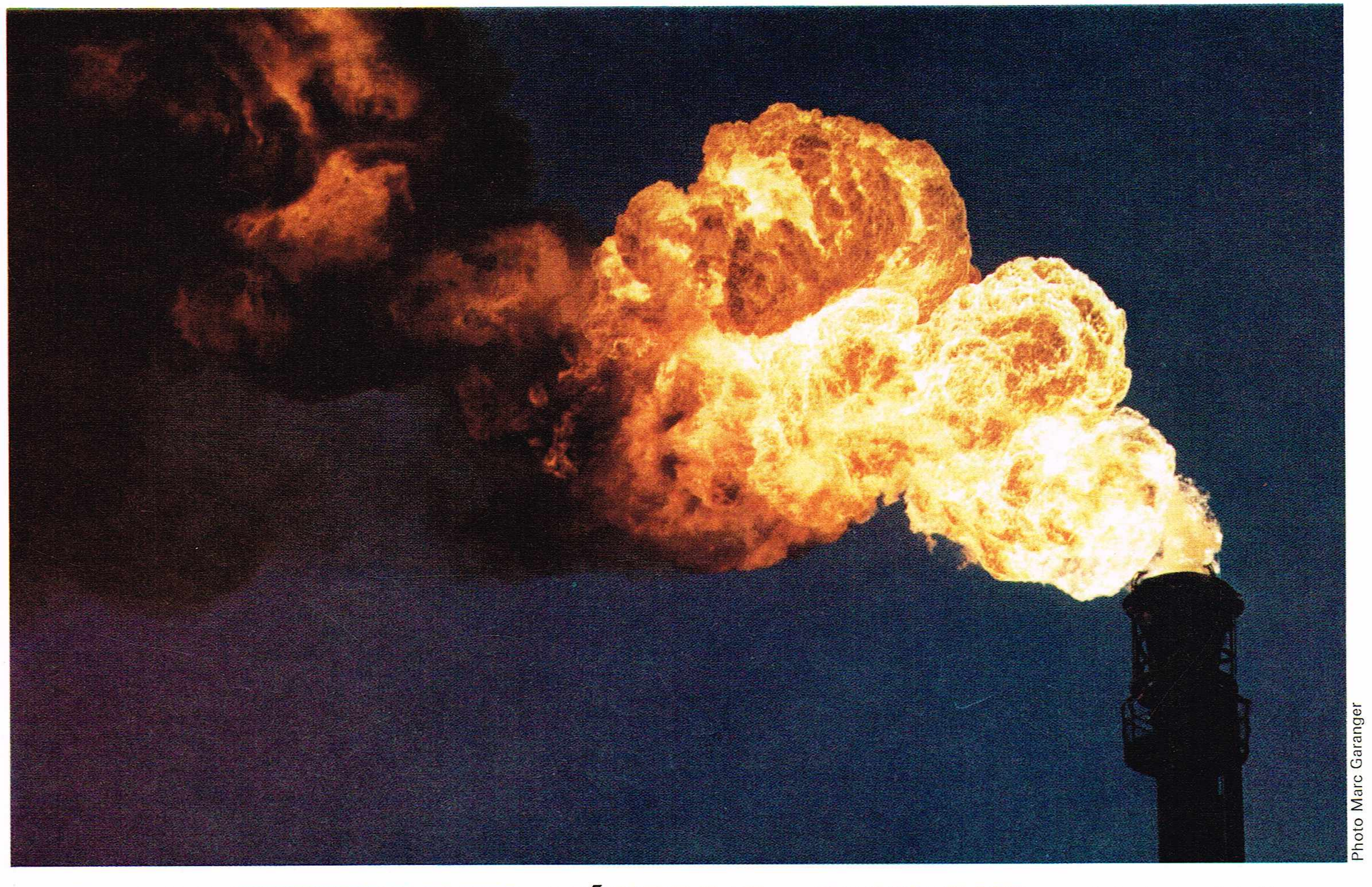


Photo Marc Garanger

▲ *La torche de brûlage symbole de la production d'énergie au XXe siècle.*

L'ÉNERGIE : PHYSIQUE ET HISTORIQUE

Qu'est-ce que l'énergie?

La notion d'énergie est, en physique, une notion fondamentale. Il est donc important d'arriver à en décrire les différents aspects afin de la bien définir. Ce sera l'objet de ce chapitre.

Le mot « énergie » est la traduction française de ἐνέργεια, mot formé de ἐν qui veut dire « dans » et ἔργον signifiant « travail ». Étymologiquement, énergie signifie donc « capacité de réaliser un travail ». C'est effectivement à partir du travail mécanique que ce concept a été introduit en physique. Cette définition est fort incomplète et nous la préciserons au cours de cet exposé par l'étude de formes d'énergie très différentes de l'énergie mécanique.

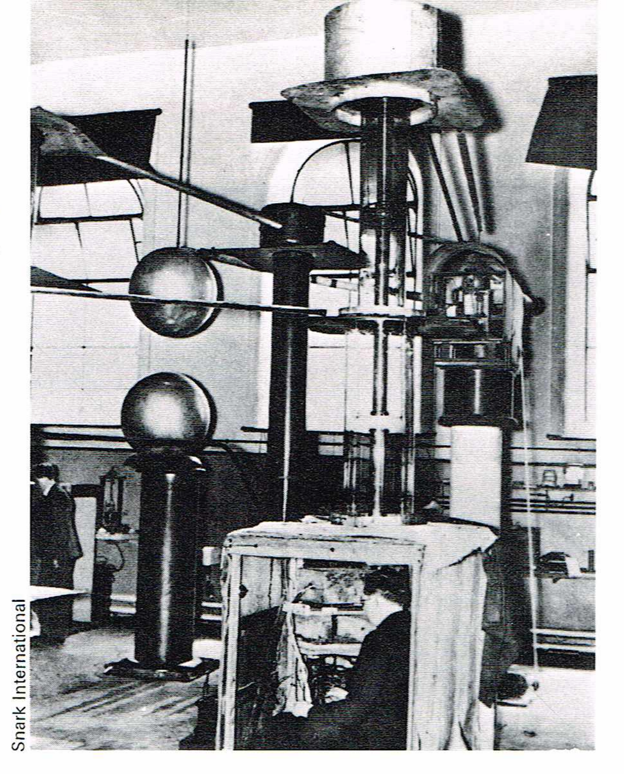
Avant d'en venir à une étude relativement détaillée des diverses formes d'énergie connues et de leurs relations, nous allons, après un rapide historique de la question, indiquer quelques-uns des caractères généraux de la grandeur appelée énergie.

Si la notion de travail est censée remonter à la fermeture du jardin d'Éden à nos premiers parents, la définition du travail mécanique est plus récente : il s'agit là de l'intégrale, le long de la courbe parcourue, du produit scalaire de la force par les déplacements élémentaires. C'est Galilée qui remarqua le premier que, lors de l'utilisation d'un palan, le produit de la force appliquée par la distance demeure constant, bien que ces deux facteurs puissent varier.

C'est également au XVIIe siècle que fut introduit le concept de force vive *(vis viva)*, c'est-à-dire d'énergie cinétique (ce nom ne lui fut donné qu'à partir du XIXe siècle). Cette notion traduit la constatation qu'un corps en mouvement est susceptible de produire un certain travail par suite d'une modification de son mouvement;

Bulloz

◀ **Age de fer — Caïn — le Matin — le Travail,** ***de Gustave Moreau (1886). Pendant longtemps, les hommes n'ont disposé que de leurs propres forces musculaires, de celles de certains animaux, de la force du vent et des eaux*** **(Musée Gustave Moreau - Paris).**


Snark International

▶ *La photo historique de l'accélérateur de protons Cockroft-Walton (accélérateur électrostatique) 1932.*

au XIXe siècle, apparaît la notion d'énergie potentielle : cette énergie est due à la position du corps considéré dans un champ de forces.

L'existence d'une correspondance entre travail mécanique et chaleur, connue expérimentalement depuis fort longtemps (frottement de deux morceaux de bois afin d'allumer un feu), n'a fait l'objet d'expériences scientifiques qu'à partir du XVIIIe siècle : sir Benjamin Thomson, comte Rumford, directeur de l'arsenal de Munich, démontra que le forage d'une âme de canon avec une mèche mal affûtée permettait (en deux heures et demie) de porter à ébullition treize litres d'eau. D'autres expériences furent conduites par l'ingénieur français G. A. Hirn au XIXe siècle; il réalisait par calorimétrie la mesure de l'élévation de température d'un morceau de plomb écrasé par un cylindre de fer d'énergie connue. Finalement, c'est le physicien écossais James Prescott Joule qui, de 1843 à 1878, établit de manière concluante l'équivalence de la chaleur et du travail en évaluant quantitativement la relation entre les unités dans lesquelles étaient mesurées ces deux grandeurs. Les effets mécaniques des phénomènes électriques font également partie de l'expérience ancestrale de l'homme : la foudre fut toujours un attribut de la colère divine. L'étude de ces phénomènes fut longtemps freinée par l'absence de sources électriques facilement utilisables; toutefois, la tribo-électricité (électricité produite par frottement) donna lieu à des expériences dès le XVIe siècle (William Gilbert, médecin de la reine Élisabeth). Au XVIIIe siècle, à l'aide de machines électrostatiques et des premiers condensateurs (bouteilles de Leyde), de nombreuses études furent faites, mettant en évidence les réactions très mécaniques (sauts et contorsions) de sujets humains à l'application de l'électricité. Galvani (1737-1798) constata que des cuisses de grenouille fraîches suspendues à un crochet de cuivre réagissaient violemment au contact d'un balcon de fer : les conclusions qu'en tira Volta le conduisirent à l'invention de la pile électrique en 1800. Ce générateur, ainsi que l'accumulateur, inventé en 1859 par G. Planté, permirent alors une étude scientifique du courant électrique et de ses divers effets, en particulier thermique et mécanique. L'énergie du courant électrique put ainsi être reliée aux énergies thermiques et mécaniques. Coulomb (1736-1806) en découvrant la loi régissant l'interaction de deux ou plusieurs charges immobiles avait déjà permis de traduire en termes d'énergie potentielle le travail récupérable sur ces charges.

C'est aux Chinois que nous devons, semble-t-il, les premiers travaux sur l'utilisation directe de l'énergie fournie par une réaction chimique à des effets de propulsion mécanique : un tube de bambou, bourré convenablement d'un mélange de charbon, de soufre et de salpêtre, constitue une fusée. Ce principe a connu au cours des âges un développement considérable en raison des tendances guerrières de l'humanité : on ne manque donc pas de documents concernant la relation entre composition du mélange, qualité de l'explosion et portée ou efficacité du projectile. Cette ligne de recherches aboutit à la poudre sans fumée de Vieille (1884) et à la dynamite de Nobel. Il y a donc ici équivalence reconnue entre énergie présente potentiellement dans un mélange chimique susceptible de réagir et énergie thermique (chaleur) et mécanique (propulsion ou effets destructeurs). Le moteur à explosion (N. A. Otto - 1876, Diesel - 1892) constitue une application plus pacifique de la combustion à la production de travail. Enfin, la pile de Volta, citée plus haut, met en évidence la production d'énergie électrique à partir d'une réaction chimique, tandis que le passage d'un courant dans un accumulateur au plomb modifie la composition chimique de ce dernier. L'énergie ainsi emmagasinée sous forme chimique est d'ailleurs récupérable par la suite sous forme électrique. La modification de l'état chimique d'un liquide par suite du passage d'un courant électrique, ou électrolyse, avait été étudiée quantitativement par Faraday (1791-1867). Enfin, la relation entre la quantité de travail effectué par un homme ou un animal et l'abondance de la nourriture qui lui est nécessaire a fait l'objet de nombreuses études de la part des physiologistes, mettant ainsi en évidence dans un domaine différent l'équivalence entre énergie mécanique et énergie chimique.

L'énergie transportée par des radiations solaires est certainement la plus anciennement connue de l'homme. Son effet thermique est évident. Et si l'étude de la photosynthèse (fabrication de glucides par les plantes vertes sous l'effet de l'ultraviolet solaire à partir du gaz carbonique de l'air) est relativement récente, il est connu depuis longtemps que ce type de plante demande pour se développer une certaine quantité de lumière. C'est le physicien écossais James Clerk Maxwell (1831-1879) qui détermina les équations représentant correctement les phénomènes électriques et magnétiques. Ces équations permirent de prévoir la propagation d'énergie au moyen d'une onde électromagnétique. L'existence de ces ondes fut mise par la suite en évidence par Hertz, qui leur a laissé son nom, en 1888. Leur utilisation pratique pour la transmission d'informations à distance, qui a connu le développement que l'on sait, remonte aux travaux de Marconi qui établit les premières liaisons radiotélégraphiques à longue distance (Manche, 1889; Atlantique, 1901). Dans le domaine des radiations de courte longueur d'onde (1 Å), Röentgen découvrit en 1895 les rayons X. Sir William Crookes en Angleterre et W. D. Coolidge aux États-Unis mirent au point des tubes émetteurs de rayons X. Enfin, la découverte en 1896 par Becquerel de la radio-activité des sels d'uranium et l'obtention par P. et M. Curie du radium permirent la mise en évidence et l'étude des radiations nucléaires. Le fait que ces radiations, tout comme les rayons X, impressionnent la plaque photographique montre que l'énergie qu'elles transportent est susceptible d'effets chimiques directs.

L'énergie nucléaire est la forme d'énergie dont la connaissance et l'utilisation sont les plus récentes, mais n'est certes pas la moins importante. A partir de la constatation faite par Becquerel de l'émission spontanée d'énergie par certains éléments, lord Rutherford (1871-1937) mit au point un modèle de la structure de l'atome; un noyau chargé positivement est entouré d'électrons négatifs qui gravitent autour. C'est également lui qui montra que la radio-activité naturelle est due à une cassure spontanée de noyaux lourds instables. A la suite de ces travaux fut mis au point le premier accélérateur de particules (sir J. Cockroft) suivi d'un grand nombre d'appareils de types variés ayant tous pour but de produire artificiellement la désintégration de noyaux stables : il s'agit alors de radio-activité artificielle. Au cours de ces transformations, il y a émission de particules diverses, et en particulier de neutrons (découverts en 1932 par J. Chadwick). O. Hahn mit en évidence en 1939 la cassure de l'uranium 238 en deux noyaux de masses à peu près égales après capture d'un neutron. Cette cassure ou « fission » libère des neutrons qui peuvent à leur tour aller briser d'autres noyaux d'uranium, donnant lieu dans des conditions favorables à une réaction en chaîne. La première réalisation expérimentale importante utilisant ce phénomène fut la pile de Fermi qui divergea (commença à fonctionner) le 2 décembre 1942. Le plutonium fabriqué par cette pile fut utilisé à la réalisation des premières bombes américaines à fission. Les recherches se poursuivirent alors à la fois dans le domaine des applications

pacifiques de l'énergie de fission et vers l'utilisation de l'énergie encore plus importante récupérable lors de la fusion de deux noyaux d'isotopes de l'hydrogène (deutérium ou tritium) pour former un noyau plus lourd (isotope de l'hélium). Ces recherches aboutirent à la mise au point sous la direction du professeur E. Teller de la bombe thermonucléaire (dite H) à fusion. Elles se poursuivent aujourd'hui dans le domaine de la fusion contrôlée.

L'évolution des idées en ce qui concerne les différents phénomènes dont nous venons de parler montre qu'au cours d'une étude de plus en plus poussée, on est arrivé à mettre en évidence la conversion d'une forme d'énergie dans une autre, et à la chiffrer. Cet historique montre à quel point la définition première et strictement mécanique que nous avons donnée était restrictive. Il indique que de très nombreux phénomènes mettent en jeu une même grandeur que nous appelons énergie et que nous connaissons sous diverses formes. Nous allons maintenant essayer de préciser quelques-uns des caractères généraux de l'énergie.

La première caractéristique de l'énergie, qui ressort immédiatement de ce que nous venons de voir, est son *aspect multiforme :* on ne peut mettre en évidence une forme d'énergie qu'en la transformant au cours d'un processus physique en une autre forme d'énergie déjà connue. C'est par cette méthode que l'on a pu établir des relations quantitatives entre les différentes formes d'énergie. Ainsi, Joule utilisait le travail mécanique effectué par un poids pour brasser de l'eau. Mesurant le travail du poids et l'élévation de température de l'eau dont il connaissait la masse, il lui était alors possible d'établir la relation entre unité de travail (énergie mécanique) et de chaleur (énergie calorifique).

L'intérêt du concept d'énergie en physique vient du fait qu'au cours des différentes transformations qu'elle peut subir, l'énergie se conserve. Ceci est une loi fondamentale de la physique et nous allons essayer de la préciser. Nous savons qu'un système de corps ne possédant que de l'énergie mécanique peut la posséder sous forme d'énergie cinétique et/ou potentielle. La somme de ces deux énergies demeure alors constante si le système est isolé (c'est-à-dire ne reçoit ni ne fournit à l'extérieur aucun travail). Un exemple classique d'un tel système est constitué par l'ensemble formé par la Terre et un pendule simple (corps pesant de faibles dimensions fixé à l'extrémité d'un fil). Le pendule a pour position d'équilibre la verticale du point où il est fixé. Le pendule, écarté de sa position d'équilibre, est abandonné sans vitesse initiale. A cet instant, toute son énergie est sous forme potentielle. Au fur et à mesure de sa course, sa vitesse augmente, et donc son énergie cinétique, tandis que son énergie potentielle diminue. Au point le plus bas de sa course, l'énergie cinétique est maximale et l'énergie potentielle minimale. A partir de cet instant, le pendule va remonter, donc gagner de l'énergie potentielle, mais sa vitesse va diminuer. On constate que, si les frottements sont suffisamment faibles, le pendule atteint son niveau de départ avant de repartir à nouveau. Il y a donc eu transformation d'énergie potentielle en énergie cinétique, puis retransformation, et la quantité d'énergie retrouvée à la fin de l'opération est identique à celle du début. Il y a eu conservation de l'énergie pour ce système mécanique isolé. Cette loi semble mise en défaut dans le cas où les frottements sont importants, et chacun sait qu'ils sont responsables de l'arrêt du mouvement. Cependant, au cours du frottement, est apparue une certaine quantité de chaleur. Nous pouvons donc continuer à considérer qu'il y a eu conservation de l'énergie à condition d'inclure dans le terme énergie la chaleur en sus de l'énergie mécanique. C'est ainsi que nous pourrons généraliser la loi de conservation de l'énergie en fonction des transformations qui se produisent dans le système en considérant les formes d'énergie les plus variées.

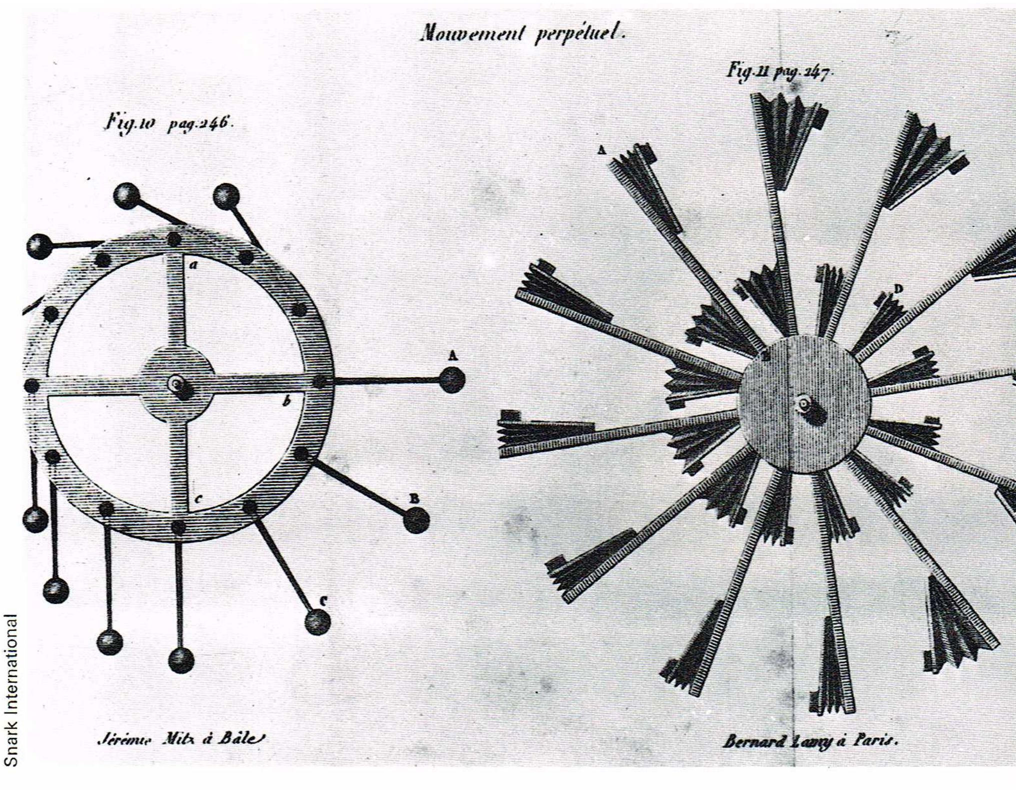
De la conservation de l'énergie (prise au sens large) dans un système isolé, nous pouvons tirer deux conclusions importantes. L'Univers étant par nature un système isolé, nous pouvons affirmer que la quantité totale d'énergie existant dans la nature, sous quelque forme que ce soit, demeure constante au cours du temps. La deuxième conséquence est l'impossibilité de construire un moteur à mouvement perpétuel. Cet appareil, qui fit l'objet de nombreuses recherches au XVIIe siècle, serait tel qu'il pourrait retourner à son état initial sans apport extérieur d'énergie après un certain nombre de transformations, et avoir cependant fourni du travail au milieu extérieur. Ce serait évidemment idéal du point de vue de l'économie de l'énergie, mais contraire à la loi de conservation qui postule que, si le système garde une énergie constante, il est isolé.

La conservation de l'énergie n'entraîne toutefois pas une conservation de l'énergie utilisable : en effet, les différentes formes d'énergie ne sont pas toutes également favorables. On assiste dans tous les processus de transformation à une certaine dégradation de l'énergie, une partie de l'énergie mise en jeu n'étant pas utilisée. Il y a donc fuite d'énergie, en général sous forme de chaleur (voir l'exemple du frottement donné plus haut). Nous examinerons ce problème plus en détail dans le cadre de l'étude de l'énergie calorifique.

Un dernier aspect de l'énergie est que, sous ses diverses formes, elle dépend en général de deux facteurs pouvant varier indépendamment. Ainsi, le même travail peut être fourni par un poids élevé travaillant sur une faible distance, ou un corps moins lourd déplacé sur une grande distance. De même, une quantité de chaleur donnée se traduira par une faible élévation de température d'une masse liquide importante et par un réchauffement sensible d'une plus faible quantité. En électricité, nous constatons qu'un courant de faible intensité sous un potentiel élevé a les mêmes effets thermiques qu'un fort courant sous une tension réduite (à condition de tenir compte du temps de passage). Ces variables appartiennent à deux groupes : les variables intensives et extensives. Nous les définirons plus précisément en ce qui concerne la chaleur.

Enfin, nous pouvons à présent préciser la relation entre énergie et travail : le travail est ce qui peut apparaître lors d'une modification de l'état d'énergie d'un système. Il est fourni à l'extérieur si l'énergie du système diminue, donné par l'extérieur dans le cas contraire. La rapidité avec laquelle le transfert d'énergie s'effectue est caractérisée par une grandeur appelée puissance : c'est le quotient de la quantité d'énergie mise en jeu par le temps mis pour transférer cette énergie. Cette grandeur est utile pour chiffrer l'utilité relative d'un dispositif de transfert d'énergie.

Au terme de cette étude préliminaire, nous avons montré que différents phénomènes mettent en jeu une même grandeur, appelée énergie, susceptible de se manifester sous des formes très diverses. Nous avons précisé un certain nombre des caractères généraux de cette grandeur et constaté qu'il était difficile, sinon impossible de définir l'énergie en soi, puisqu'on ne peut l'observer que dans les effets qu'elle produit. C'est pourquoi nous allons maintenant revenir à une étude plus détaillée des formes d'énergie que nous avons citées plus haut. Cette étude nous permettra de préciser la notion d'énergie et d'expliquer les équivalences entre ses différentes formes constatées précédemment.



▲ ***Planche sur l'étude d'un mouvement perpétuel extraite du* Manuel chronométrique *de Firmin Didot.***



J.N. Reichel - TOP

▲ *En métallurgie, les traitements thermiques appliqués aux métaux et aux alliages permettent d'obtenir des propriétés mécaniques bien définies.*

Énergie mécanique

L'énergie mécanique possédée par un corps ou un ensemble de corps se présente sous deux formes : l'énergie cinétique, liée à l'état de mouvement de ce corps, et l'énergie potentielle, dépendant de la position de l'objet considéré dans un champ de forces donné (pesanteur par exemple).

L'énergie cinétique est par définition égale à la moitié du produit de la masse du corps considéré par le carré de sa vitesse :

$$E_c = 1/2\, mv^2$$

L'énergie potentielle se définit de la manière suivante : admettons qu'un corps se déplace d'un point A à un point B dans une région de l'espace dans laquelle règne un champ de forces tel que le travail de ces forces quand elles déplacent le corps de A en B ne dépende que de A et B et non du chemin parcouru (forces conservatives), alors

$$W_{AB} = E_p\,(A) - E_p\,(B)$$

où W_{AB} est le travail des forces déplaçant le corps de A en B et où E_p est une fonction de la position du corps dans l'espace, appelée énergie potentielle du corps. La définition que nous venons de donner présuppose que l'on puisse définir un point origine 0 tel que son énergie potentielle soit nulle. Mais nous ne changeons rien à la valeur du travail en ajoutant ou retranchant la même valeur à E_p (A) et E_p (B), c'est-à-dire en prenant une autre origine pour la fonction E_p. L'énergie potentielle n'est donc définie qu'à une constante additive près. Ceci n'est nullement gênant, dans la mesure où elle n'intervient que par sa différence : en effet, le travail d'un corps tombant de 10 cm sous l'effet de la pesanteur dans une pièce située au 2e étage d'un bâtiment est le même, que l'on considère le zéro d'énergie potentielle au niveau du plancher ou au niveau du sol. Le niveau d'énergie potentielle nulle sera donc choisi dans chaque cas en fonction de la commodité de traitement du problème envisagé. L'énergie potentielle est souvent prise comme nulle à l'infini (cas d'un corps dans un champ électrostatique, ou d'un satellite dans la zone d'attraction d'un astre). Quand un corps en mouvement perd ou gagne de la vitesse, un certain travail peut être récupéré ou doit lui être fourni ; il y a modification de l'énergie cinétique. La relation entre ces quantités est donnée par le théorème de l'énergie cinétique : *Le travail effectué par la force de A en B est égal à la différence d'énergie cinétique du corps entre les points A et B :*

$$W_{AB} = E_{cB} - E_{cA}$$

La somme de l'énergie potentielle et de l'énergie cinétique d'un corps est appelée énergie mécanique totale de ce corps (elle n'est donc définie comme l'énergie potentielle qu'à une constante près). Cette énergie mécanique totale se conserve dans un système isolé (exemple du pendule cité précédemment). Il ne peut donc y avoir que transformation d'énergie potentielle en énergie cinétique, et *vice versa*, dans un tel système (en l'absence de frottements). Un corps matériel placé dans un champ de forces conservatives tend à occuper des positions bien déterminées, dites positions d'équilibre, telles que son énergie potentielle soit minimale. L'équilibre est dit stable si le corps écarté de cette position y revient, instable s'il continue à s'en éloigner. L'étude de l'énergie mécanique ne met en jeu que des observations macroscopiques, c'est-à-dire faites sur des systèmes ou corps de dimensions importantes : cela explique ses limitations, mais aussi le fait que c'est la première forme d'énergie ayant donné lieu à une étude développée.

Énergie calorifique

Nous allons au cours de l'étude de cette forme d'énergie, qui est l'objet de ce que l'on appelle la thermodynamique, aborder successivement les points de vue macroscopique et microscopique.

Du point de vue macroscopique, l'étude d'un système revient à le caractériser par un certain nombre de variables aisément mesurables. Les variables permettant de définir l'état du système ne sont généralement pas indépendantes, mais liées par des relations, appelées fonctions d'état et dont la connaissance permet de définir l'état du système. Dans l'étude des différentes fonctions d'état utilisées en thermodynamique, nous verrons intervenir énergie calorifique, travail, pression et volume.

La première fonction d'état importante est l'énergie interne du système U. Elle est définie de la manière suivante. Si un système passe d'un état d'équilibre A à un état d'équilibre B en échangeant avec l'extérieur du travail W et de la chaleur Q, on écrit :

$$U\,(B) - U\,(A) = (W + Q)_{AB}$$

L'importance de cette fonction d'état vient de la propriété suivante : « la somme W + Q ne dépend pas du mode de transformation faisant passer le système de A à B, mais seulement des états initial A et final B ». Cet énoncé est connu sous le nom de *principe de l'état initial et de l'état final*. Cette propriété de l'énergie interne rappelle celle de l'énergie mécanique totale dont elle apparaît comme une sorte de généralisation prenant en compte les échanges de chaleur.

A partir de l'énergie interne peuvent être définies d'autres fonctions d'état adaptées au système étudié : pour un fluide, une fonction d'état importante est l'enthalpie :

$$H = U + PV$$

Une autre fonction d'état importante et sur la signification de laquelle nous reviendrons par la suite est la fonction entropie définie par :

$$S\,(B) - S\,(A) = \int_A^B \frac{dQ}{T}$$

(intégrale de l'état A à l'état B du quotient de la quantité de chaleur échangée à chaque instant avec l'extérieur par la température absolue à laquelle se fait cet échange). La variation de chacune de ces fonctions d'état ne dépend que de l'état A et de l'état B. Il en résulte que toute combinaison linéaire de ces fonctions est elle-même fonction d'état. C'est ainsi que l'on peut également définir l'énergie libre (fonction de Helmholtz)

$$F = U - TS$$

et l'enthalpie libre (fonction de Gibbs)

$$G = H - TS$$

A cette occasion, nous allons préciser la notion de *variables intensives* et *extensives*. On constate que les fonctions d'état citées plus haut sont en fait des indicateurs de l'état d'énergie du système. Ces expressions apparaissent toujours en dernière analyse comme un produit de deux facteurs. L'un de ces facteurs joue le rôle de variable de grandeur ou de position (extensive), l'autre de facteur de tension (intensive). Ces deux groupes se distinguent par le fait que les variables intensives ne sont pas additives, alors que les variables extensives le sont. Aussi, lors de la réunion de deux systèmes identiques, la variable extensive double, alors

que l'intensive est inchangée. L'application de ce critère à l'énergie mécanique mise en jeu dans une détente W = PV permet d'affirmer que le volume est extensif et la pression intensive. Pour l'énergie calorifique, la variable intensive est la température absolue T, la variable extensive, l'entropie S.

Après ces quelques aperçus des règles régissant l'étude macroscopique d'un système, il est intéressant de se pencher sur le même problème **du point de vue microscopique.** L'un des éléments de preuve de l'hypothèse moléculaire a été l'étude du mouvement brownien. On appelle ainsi le mouvement incessant de petites particules solides en suspension dans un fluide sous l'action de chocs moléculaires. Ce mouvement met en évidence un mouvement des molécules. Par ailleurs, ces molécules étant très nombreuses et animées de mouvements aléatoires, l'étude de leur mouvement doit se faire par des méthodes statistiques. On peut montrer par ces méthodes que l'énergie cinétique moyenne de chaque particule d'un ensemble interagissant mécaniquement est la même et ne dépend pas de la masse de la particule (théorème d'équipartition). Or, on constate que le mouvement brownien augmente avec la température absolue, et ce linéairement. On en conclut donc que l'énergie cinétique d'agitation des molécules est proportionnelle à la température absolue. Ceci est fondamental, et permet d'affirmer que l'énergie calorifique fournie à un système (en l'occurrence gaz ou liquide, mais cela reste valable pour les solides) apparaît sous forme d'une augmentation de l'énergie cinétique de ses molécules. Ainsi se trouve établie directement l'équivalence entre énergie calorifique et énergie mécanique démontrée expérimentalement par Joule. Par ailleurs, il est alors possible de traiter les problèmes thermodynamiques en utilisant les résultats de la mécanique statistique en les appliquant à ces problèmes particuliers. D'où le développement des statistiques thermodynamiques, Maxwell-Boltzmann, Fermi-Dirac et Bose-Einstein.

Cette conception microscopique va permettre de préciser la fonction entropie introduite plus haut. En effet, l'énergie cinétique possédée par les molécules peut être soit ordonnée, soit désordonnée. Dans le premier cas, cette énergie est récupérable sous forme de travail mécanique ; dans le second, elle apparaît uniquement sous forme de chaleur : ainsi, au cours d'un travail mécanique, la chaleur due au frottement correspond à un passage de l'ordre au désordre. La fonction entropie, liée à la quantité de chaleur mise en jeu dans les processus, correspond en fait à une mesure du désordre moléculaire. Ceci explique que cette fonction soit croissante dans tous les processus naturels. Nous pouvons également maintenant expliquer la nécessité de posséder deux sources de chaleur pour pouvoir transformer la chaleur en travail (ce principe, dit principe de Carnot, régit tous les moteurs thermiques). En effet, il apparaît que, pour ordonner le mouvement moléculaire et pouvoir récupérer du travail, il faut créer un sens au mouvement, donc un flux d'énergie, d'où la nécessité de deux sources à températures différentes.

Énergie électrique

Nous allons considérer deux de ses formes, l'énergie d'une distribution de charges et l'énergie due à un courant.

Entre deux ou plusieurs charges ponctuelles existent des forces. Leur forme est donnée par la loi de Coulomb : *Les forces exercées l'une sur l'autre par deux charges électriques ponctuelles sont égales et opposées, dirigées suivant la droite qui les joint, proportionnelles aux deux charges et inversement proportionnelles au carré de leur distance. Elles sont répulsives si les deux charges sont de même signe, attractives autrement.*

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{qq'}{r^2} \quad \text{où} \quad \varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi\,10^9}\ \text{SI}$$

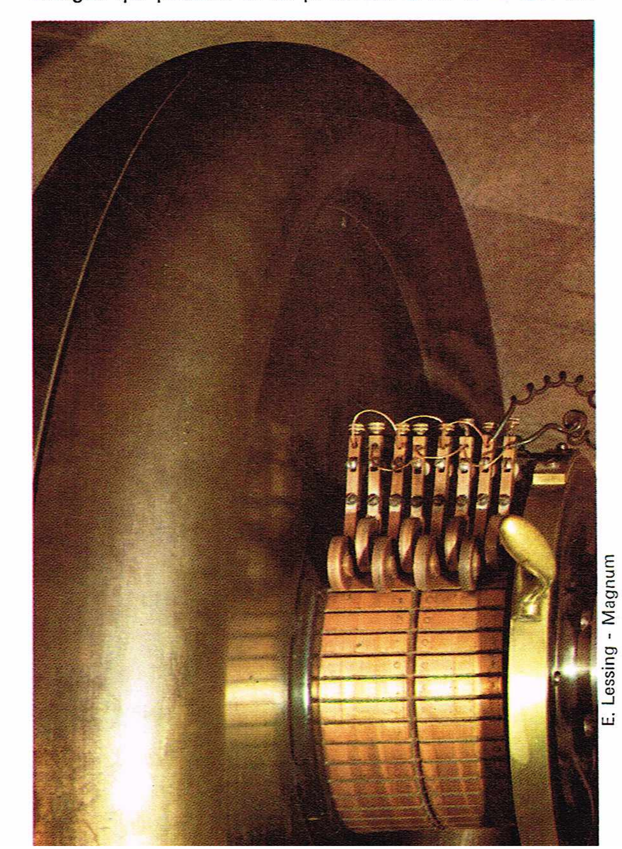
dans le vide et l'air.

Cette relation permet de calculer la force subie par une charge en présence de *n* autres charges : il suffit d'ajouter les forces agissant sur la charge de la part de chacune des autres charges. Cette force ne dépend en fait que de deux éléments, la charge de la particule qui nous intéresse et sa distance à toutes les autres charges qui sont connues. On dit alors que la force est le produit de la charge par le vecteur champ électrique, force subie par la charge unité placée dans la position considérée : $\vec{F} = q\vec{E}$, et pour une charge isolée, le champ créé à la distance *r* sera $E = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}\dfrac{Q}{r^2}$

Il apparaît donc que l'énergie électrique d'une charge *immobile* dans un champ électrique est de l'énergie potentielle. Le travail récupérable lors d'un déplacement entre deux points est égal à l'intégrale le long du chemin suivi du produit scalaire de la force par l'élément de distance. La charge étant constante, cette énergie est égale au produit de cette charge par l'intégrale du vecteur champ électrique sur le même chemin. Cette dernière quantité est appelée différence de potentiel entre les deux positions, initiale et finale. L'énergie peut donc se mettre sous la forme du produit charge-potentiel. Elle est définie, comme le potentiel, à une constante additive près. La charge apparaît comme une grandeur extensive, le potentiel comme une grandeur intensive. Ces résultats peuvent être étendus au cas de charges non isolées à condition de considérer les densités de charge, linéique, en surface ou en volume. C'est ainsi que, dans un condensateur (dispositif comprenant deux armatures métalliques séparées par un isolant ou diélectrique), la matière isolante emmagasine une charge Q = CV où V est le potentiel et C la capacité, coefficient dépendant de la forme et des dimensions du condensateur. Son énergie est alors $1/2\ QV = 1/2\ CV^2$. De même, on démontre grâce aux définitions exposées plus haut que la densité d'énergie dans un diélectrique au sein duquel règne un champ $\vec{E}$ est égale à $\varepsilon E^2/2$ où ε est la constante diélectrique du milieu (ε_0 pour le vide et l'air).

L'énergie mise en jeu dans un courant peut être cause d'effets thermiques (effet Joule) ou d'effets mécaniques si le conducteur se trouve placé dans un champ magnétique.

Dans un conducteur métallique, les électrons sont libres de se déplacer, et ce d'autant plus aisément que la résistance de ce conducteur est moins grande. Ils se déplacent au milieu d'un réseau cristallin constitué d'ions positifs. Si l'on applique aux extrémités du conducteur une différence de potentiel, le champ créé exerce sur les électrons une force qui les met en mouvement. Au cours de ce mouvement, il se produit des chocs avec les ions du réseau, et les électrons cèdent une partie de leur énergie cinétique au réseau : cette énergie apparaîtra sous forme d'agitation thermique, donc de chaleur. L'énergie libérée est proportionnelle au nombre de charges qui passent et au potentiel. D'où W = QV. On



E. Lessing - Magnum

◄ ***Moteur électrique inventé par l'Autrichien Johann Kravogz** (musée des Techniques, Vienne).*

peut alors introduire la grandeur intensité égale au nombre de charges passant en une section par unité de temps : $I = Q/t$. Le potentiel appliqué crée un courant dont l'intensité est d'autant plus grande que la résistance est faible. Ceci s'exprime par la loi d'Ohm $V = RI$. On en déduit que l'énergie calorifique libérée pendant un temps t par un courant I est $W = RI^2t$

Par ailleurs, une charge électrique se déplaçant avec une vitesse v dans un champ magnétique B subit une force normale à la vitesse et au champ et de grandeur $\vec{F} = q\vec{v} \wedge \vec{B}$. Un conducteur parcouru par un courant et placé dans un champ verra donc ses électrons de conduction subir ce type de force et la subira lui-même, les électrons ne pouvant en sortir. Il y a donc ici création d'énergie mécanique utilisable à partir de l'énergie électrique. Ce type d'effet est utilisé dans les moteurs électriques.

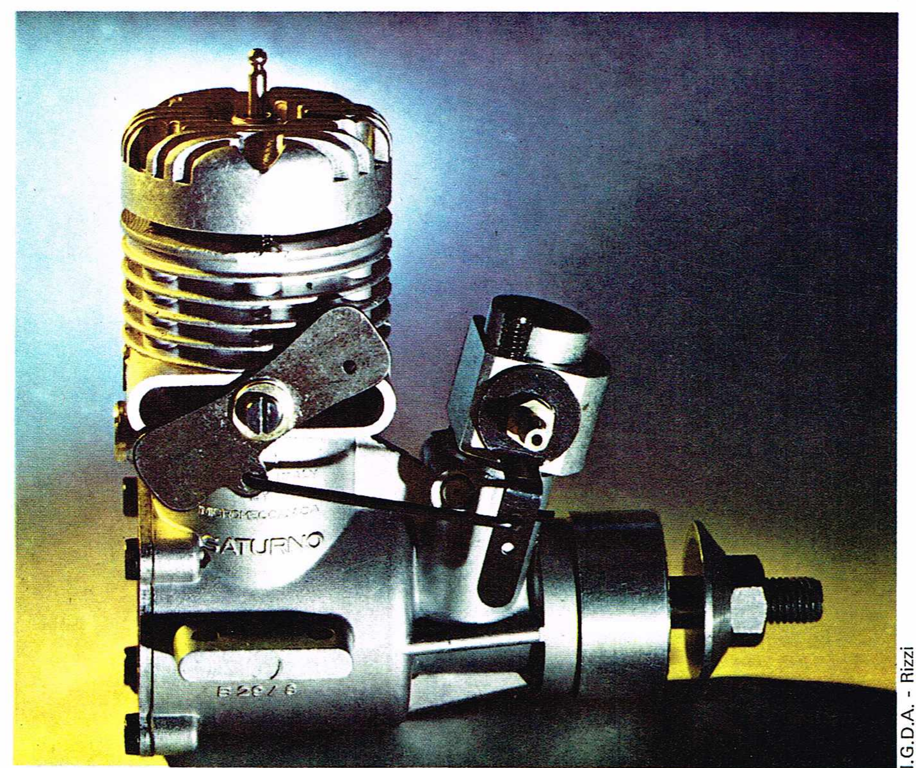
Au plan microscopique, l'énergie électrique apparaît donc comme celle de particules, immobiles ou non, dans un champ de forces. Elle se réduit donc sous les aspects traités à l'énergie mécanique.

Énergie chimique

En dernière analyse, les édifices chimiques sont constitués d'atomes liés électriquement par les électrons de leur couche externe. Ces liaisons peuvent être de différents types : liaisons ionique, covalente, métallique, selon qu'il y a don d'électrons d'un atome à un autre (les deux devenant alors des ions chargés électriquement) ou mise en commun d'électrons. Dans le cas de la liaison métallique, les électrons de liaison se déplacent au sein d'un réseau formé par les ions métalliques (voir *Énergie électrique*). Dans tous les cas, le système obtenu est maintenu stable par des forces de nature électrostatique. De ce qui précède, on peut donc déduire que l'énergie chimique correspond à une énergie potentielle électrostatique.

Cette énergie peut être libérée par rupture des liaisons existantes. Il s'agit alors d'une réaction dite exothermique (qui fournit de la chaleur). L'énergie fournie par la destruction d'une molécule peut alors provoquer la rupture d'une autre et, dans des conditions favorables, une sorte de réaction en chaîne se produit jusqu'à épuisement du milieu réactif. Il faut en général un apport extérieur d'énergie pour faire démarrer la réaction. La partie de l'énergie qui n'est pas utilisée à l'entretien de la réaction apparaît sous forme de chaleur. L'exemple type de ce genre de réaction est la combustion vive : un feu doit être allumé, puis s'entretient jusqu'à épuisement du combustible en fournissant de la chaleur au milieu extérieur. La chaleur produite dans ces réactions peut d'ailleurs être convertie en énergie mécanique (moteurs à explosion, armes à feu). Une forme plus sophistiquée d'utilisation de cette énergie est la pile à combustible, où l'énergie de réaction d'oxygène et d'hydrogène gazeux est directement convertie en énergie électrique. Il en est de même dans les piles hydroélectriques.

L'énergie chimique apparaît donc comme une énergie stockée dans les corps sous forme électrique. Elle peut être présente naturellement et libérable par réaction comme il vient d'être dit. On peut aussi modifier les liaisons dans certains systèmes en apportant une certaine quantité d'énergie que l'on emmagasine ainsi sous forme chimique en vue d'une utilisation ultérieure. C'est ce qui se passe lors de la charge d'un accumulateur. La modification de la nature des plaques par passage d'un courant électrique est réversible, ce qui permet de récupérer une partie de l'énergie emmagasinée.



▼ ***Moteur propulseur, de type alternatif à combustion interne : un exemple de convertisseur d'énergie chimique en énergie mécanique.***

I.G.D.A. - Rizzi

Énergie rayonnante

On appelle ainsi l'énergie transportée par les ondes électromagnétiques. L'existence de ce type d'ondes a été prévue à partir des équations de Maxwell et démontrée par les expériences de Hertz. Une onde électromagnétique correspond à la propagation à travers l'espace d'un champ électrique et d'un champ magnétique croisés. La propagation s'effectue dans le vide à la vitesse de la lumière, les champs étant en opposition de phase et ayant pour fréquence celle de l'onde. On montre alors que la densité d'énergie transportée par une telle onde est égale au flux d'un vecteur appelé *vecteur de Poynting*, égal au quotient par la perméabilité magnétique μ du milieu de propagation du produit vectoriel des champs électriques et magnétiques :

$$\vec{P} = \vec{E} \wedge \vec{B}/\mu$$

L'importance de ces ondes est due au fait qu'elles rendent possible la propagation d'énergie sans aucun support matériel. Elles sont responsables de l'équilibre énergétique de l'Univers.

Si la conception exposée ci-dessus permet d'expliquer nombre de phénomènes liés à ces ondes tels la diffraction, les interférences et la diffusion de ces ondes, elle est insuffisante pour en interpréter d'autres : effet photoélectrique (arrachement d'électrons à une surface métallique éclairée) ou effet Compton (conservation de la quantité de mouvement dans le cas d'un électron se déplaçant sous l'action d'une radiation électromagnétique). Pour expliquer ces phénomènes, il est nécessaire de faire appel à une nouvelle représentation du rayonnement (théorie quantique de Max Planck) : une onde électromagnétique est composée de particules appelées photons présentant les caractéristiques suivantes. La masse du photon est évanescente (quasi nulle), sa vitesse dans le vide est égale à celle de la lumière, et son énergie et sa quantité de mouvement sont liées à la fréquence ν de l'onde à laquelle il est associé par les deux relations suivantes :

$$E = h\nu \qquad \mathbf{p} = h\nu/c$$

(h constante de Planck $6{,}62 \cdot 10^{-34}$ SI)

On peut expliquer dans cette représentation qu'un atome passant d'un état d'énergie à un autre par saut électronique émette (ou absorbe) une énergie bien définie sous forme d'une radiation de fréquence déterminée et égale à :

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$$

Cette dualité onde-corpuscule, une fois admise, a permis de traiter les différents problèmes liés aux ondes électromagnétiques et à leur interaction avec la matière.

Énergie nucléaire

L'énergie nucléaire est par définition l'énergie liée au noyau atomique. Cette énergie peut se déterminer à partir d'une relation introduite par Einstein et établissant l'équivalence de la masse et de l'énergie. Cette relation,

qui permet de déterminer une valeur absolue de l'énergie interne d'un système, postule que l'énergie d'une particule est égale au produit de sa masse par le carré de la vitesse de la lumière : $E = mc^2$.

Cette relation a pu être vérifiée expérimentalement par ses conséquences. En effet, elle sous-entend la possibilité de produire de l'énergie par destruction de matière, ou, au contraire, la création de matière à partir d'une quantité d'énergie suffisante. Or les deux phénomènes ont été observés. Anderson a réussi à constater la création de paires électron-antiélectron à partir de rayonnements γ de haute énergie (rayons cosmiques). De même, la rencontre de deux antiparticules conduit à leur annihilation avec émission d'un photon d'énergie équivalente à leur masse. L'énergie mise en jeu est extrêmement importante (le coefficient c^2 étant égal à $9 \cdot 10^{16}$ SI).

La relation d'Einstein permet d'expliquer la libération d'énergie lors des processus de fission et de fusion. On constate que, lors de la rupture d'un noyau lourd, la somme des masses des noyaux plus légers auxquels il donne naissance est toujours supérieure à la masse du noyau initial. Le défaut de masse en question correspond à l'énergie de liaison du noyau lourd. C'est cette énergie que l'on récupère sous forme thermique au cours de la fission.

De la même manière, il est possible de produire de l'énergie par création d'un noyau lourd à partir de deux noyaux légers (isotopes de l'hydrogène). Ce processus, appelé fusion, sera étudié en détail dans le chapitre consacré à l'énergie nucléaire.

Ces phénomènes se rencontrent dans la nature et présentent une grande importance. L'énergie du Soleil et des étoiles résulte de processus de fusion, tandis que la désintégration des roches radio-actives semble responsable pour une part de l'entretien de la chaleur interne du globe terrestre.

L'ensemble des considérations précédentes concernant les différentes formes d'énergie ne permet pas d'avoir une définition pleinement satisfaisante de la grandeur énergie. Toutefois, un certain nombre de caractéristiques importantes peuvent en être dégagées. Tout d'abord, l'unicité de l'énergie est amplement prouvée par les possibilités de transformation d'une forme en l'autre. Par ailleurs, l'énergie interne d'un système peut être chiffrée absolument, la relation d'Einstein permettant de tenir compte de l'énergie de masse. Enfin, la théorie quantique montre que, du point de vue microscopique, l'énergie d'un système ne varie pas continûment au cours de ses échanges avec l'extérieur, mais bien par sauts (quanta d'énergie). En conclusion, l'utilité fondamentale de cette notion est la possibilité de définir de manière très claire l'état d'un système, et son mode d'interaction avec le milieu ambiant. L'énergie elle-même apparaît comme une abstraction mathématique, liée à différentes lois de conservation dans l'Univers, mais dont l'utilité réside dans la connaissance des propriétés qui lui sont attachées. De ce point de vue, c'est un outil très puissant de connaissance en physique.

Les unités et la mesure de l'énergie

La grandeur énergie que nous avons tenté de définir préalablement est une grandeur mesurable. Il est donc nécessaire de définir les unités servant à la caractériser sous ses diverses formes. C'est là l'objet de la première partie de cet exposé. Nous donnerons ensuite quelques indications sur les méthodes permettant cette mesure.

L'unicité de l'énergie a été mise en évidence : en bonne logique, il s'ensuit la possibilité de n'utiliser à sa mesure qu'une seule unité. Toutefois, étant donné la diversité de ses formes et pour des raisons de commodité, nous rencontrerons en fait un grand nombre d'unités, introduites historiquement au cours de l'étude des énergies décrites plus haut.

L'unité fondamentale d'énergie, admise par le système international d'unités, est le **joule** : c'est le travail effectué par une force de 1 newton déplaçant son point d'application de 1 mètre dans sa propre direction (le système international admet 6 unités de base : mètre, kilogramme masse, seconde, ampère, degré Kelvin, candela). Dans le système CGS (centimètre, gramme, seconde), l'unité d'énergie est l'**erg** (1 erg = 10^{-7} J). Une autre unité, moins utilisée, est le **kilogrammètre** : travail fourni par une force de 1 kilogramme-force déplaçant son point d'application de 1 mètre dans sa direction (1 kgm = 9,81 J).

Les unités de puissance correspondantes sont le **watt** (joule par seconde) et l'**erg par seconde.** On utilise également pour les moteurs le **cheval-vapeur** (ch) 1 ch = 736 W = 75 kgm/s. Ces unités sont celles que l'on utilise à la mesure des énergies et puissances mécaniques. Toutes les autres unités sont convertibles dans les systèmes indiqués.

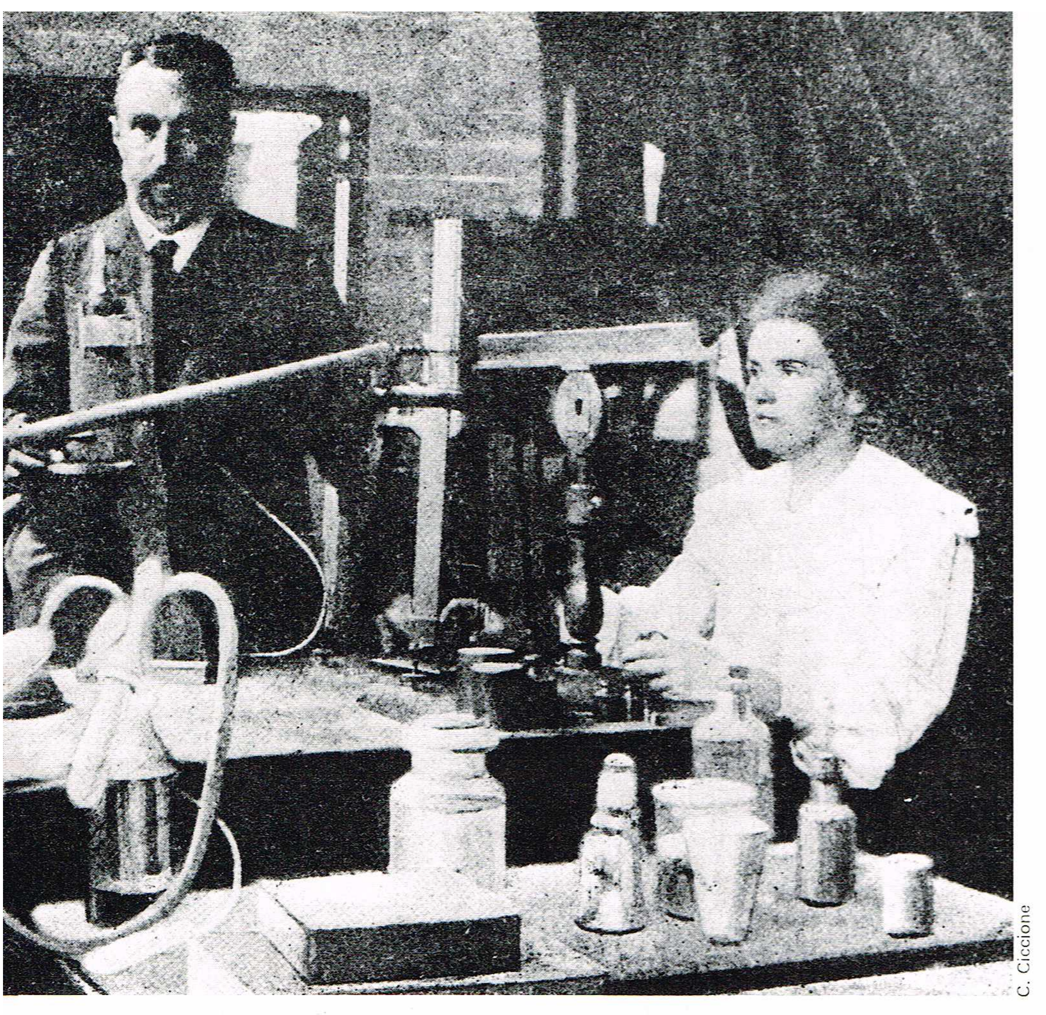
Les unités propres aux diverses formes d'énergie sont dites hors système, et sont utilisées par suite de leur bonne adaptation à la mesure des grandeurs particulières considérées. L'unité de base des mesures d'énergie calorifique est la **calorie** (cal) : c'est la quantité de chaleur qu'il faut fournir à 1 gramme d'eau pure pour porter sa température de 14,5 °C à 15,5 °C. Les multiples de cette unité sont la **kilocalorie** ou grande calorie (1 kcal = 1 000 cal) et la mégacalorie ou **thermie** (1 th = 10^6 cal). On utilise également dans l'industrie la **millithermie** (mth) qui est donc égale à une grande calorie. L'industrie frigorifique, traitant de quantités de chaleur enlevées, emploie la **frigorie** (fg). Une frigorie est égale à une kilocalorie négative. Joule a établi l'équivalence de la chaleur et du travail en mesurant la quantité de chaleur associée à un travail d'un joule, soit 4,1855 joules par calorie. L'ensemble de ces unités est donc convertible en joules, seule unité légale de quantité de chaleur. Le Royaume-Uni utilise le *B. t. u.* (British thermal unit) qui est égal à 252 calories (1 055 J).

L'énergie électrique est mesurée en **watts-heure.** Cette unité correspond à l'énergie développée par une puissance de 1 watt pendant une heure. Elle est donc égale à 3,6 kilojoules (3 600 joules). On utilise également le **kilowatt-heure** (kWh). Les compteurs électriques d'installations sont gradués dans cette unité.

L'énergie chimique, se manifestant surtout lors de sa transformation en chaleur ou travail, se mesurera dans les unités qui caractérisent ces deux sortes d'énergie, c'est-à-dire en calories (ou kilocalories) ou en joules. En chimie, l'énergie thermique récupérable lors de la destruction d'un corps est fréquemment rapportée à une mole (6,02 10^{23} atomes, ou molécules) de ce corps. On chiffre alors les énergies en kilocalories par moles d'atomes ou de molécules.

Le problème de la mesure se complique lors de l'étude de l'énergie rayonnante transportée par un faisceau lumineux : en effet, l'énergie émise par une source lumineuse et reçue par un observateur dépend de la direction d'observation et n'est pas la même dans les différentes longueurs d'onde susceptibles d'être émises par la source. La mesure des effets lumineux fait l'objet de la photométrie visuelle. Pour une lumière de constitution spectrale donnée, la puissance transportée est mesurée par le flux lumineux. L'unité de flux lumineux est le **lumen** : c'est là le flux rayonné par une source d'intensité 1 candela dans un angle solide de 1 stéradian. L'intensité de la source (puissance totale rayonnée) est mesurée en **candelas** (cd) : soixantième partie de l'intensité lumineuse d'un centimètre carré de la surface d'un corps noir porté à la température de fusion du platine (2 046 °K). L'intensité par unité de surface ou luminance est mesurée en **nits** (cd/m^2). Le flux reçu par un écran (puissance reçue) a pour unité le **lux** : éclairement d'une surface de 1 m^2 recevant un flux de 1 lumen uniformément réparti (ou encore éclairement d'une surface disposée normalement à un mètre d'une source de 1 candela). Ces unités sont des unités de puissance et on passera à l'énergie en tenant compte du temps d'émission. Toutefois, l'assimilation flux-puissance n'a de sens que pour une lumière de composition spectrale donnée. En effet, la proportionnalité entre les unités de photométrie visuelle citées plus haut et les unités énergétiques est variable avec la longueur d'onde de la lumière considérée. C'est pourquoi s'est développée une photométrie énergétique dans laquelle on transforme préalablement la lumière en chaleur. Les unités utilisées sont alors celles qui mesurent l'énergie thermique.

Les physiciens nucléaires ont introduit pour la mesure de l'énergie des particules une unité appelée **électron-volt** (eV) : c'est l'énergie cinétique acquise par un électron accéléré sous une différence de potentiel



C. Ciccione

▲ Pierre et Marie Curie *dans leur laboratoire.*

▶ *Page ci-contre, figure 1 : l'atome de sodium qui contient un seul électron sur la couche périphérique* M, *le cède à l'atome de chlore et devient un ion* Na^+ *alors que l'atome de chlore qui gagne un électron sur sa couche* M *devient* Cl^-. *La configuration électronique des ions ainsi formés est celle des gaz rares : l'ion* Cl^- *a pris la configuration de l'argon et l'ion* Na^+ *celle du néon. Figure 2. Schématisation des liaisons covalentes :* a) *liaison simple pour H ou Cl. Les points représentant les électrons des couches externes; les symboles H, Cl ou O, les noyaux et les électrons des couches internes; le tiret, la paire d'électrons de liaison. Cette paire appartient à l'environnement électronique des deux atomes. L'atome Cl a sept électrons périphériques dont l'un est célibataire, l'apport d'un autre électron lui donne une configuration avec quatre paires d'électrons et une couche externe saturée qui est celle de l'argon;* b) *double liaison simple pour* H_2O; c) *liaison double pour* O_2.

de 1 volt. Cette énergie est donc égale à $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ joule. On utilise fréquemment ses multiples, le **méga-électron-volt** (1 MeV = 10^6 eV) et le **giga-électron-volt** (1 GeV = 10^9 eV). Les pays anglo-saxons donnent à cette dernière unité le nom de **billion d'électrons-volts** ou BeV. C'est la raison pour laquelle le synchrotron de 6 GeV de l'université de Berkeley aux États-Unis est appelé bevatron.

D'autres unités ont été introduites qui sont liées à l'énergie produite ou reçue au cours de la désintégration radio-active.

L'activité d'une source (nombre de désintégrations par seconde) se mesure en **curies** (activité d'une source produisant $3{,}7 \cdot 10^{10}$ désintégrations par seconde). La connaissance de cette activité permet la détermination de l'énergie rayonnée par la source si l'on connaît l'énergie par désintégration. L'effet d'ionisation produit par le rayonnement nucléaire est mesuré en **röentgens** (R) : quantité de rayonnement produisant dans 0,001 293 g d'air une quantité d'électricité égale à $1/(3 \cdot 10^9)$ coulomb (1 unité CGS). Enfin, le **rem** mesure l'effet biologique produit par une irradiation. A énergie égale, cet effet peut varier. Cette unité mesure donc non point l'énergie transportée par le rayonnement, mais celle absorbée par le milieu vivant.

Après avoir dressé la liste des unités les plus couramment utilisées à la mesure de l'énergie sous les diverses formes précédemment décrites, il est intéressant d'étudier les *méthodes* permettant de mesurer la grandeur énergie. Pour cela, il faut se remémorer les caractéristiques de l'énergie telles que nous les avons définies dans le chapitre précédent. Il est apparu que l'énergie pouvait être considérée comme le produit de deux variables, intensive et extensive : *une première voie de mesure* consiste donc à déterminer séparément et simultanément les valeurs des deux variables, mises en jeu au cours d'un transfert d'énergie : leur produit fournira le résultat cherché; *une deuxième voie* fait appel à la détermination de la puissance mise en jeu et du temps pendant lequel elle est mise en jeu : la mesure des énergies se ramène alors à celle des puissances. *Enfin*, nous avons vu que les formes d'énergie sont convertibles entre elles. Il sera donc possible par une troisième voie de mesurer une énergie en la convertissant préalablement en une énergie pour laquelle on dispose d'une méthode de mesure éprouvée (à condition toutefois de s'assurer que la conversion se fait sans pertes).

La mesure de l'énergie mécanique fait souvent appel à la première méthode : on mesure les forces et couples (dynamomètres et couplemètres) et les déplacements. On en déduit le travail effectué. La mesure de l'énergie cinétique peut s'effectuer par transformation en énergie potentielle comme dans le cas du pendule balistique. On peut également convertir l'énergie mécanique en énergie thermique et mesurer ainsi cette dernière : c'est là le principe des expériences de Joule et de Hirn.

L'énergie thermique est généralement mesurée par détermination de l'élévation de température d'un corps de masse et de chaleur massique connues auquel on communique la quantité de chaleur à mesurer. C'est là encore une application de la première méthode indiquée plus haut.

L'énergie électrique peut être déterminée par mesure de la puissance mise en jeu (wattmètre) et mesure du temps de passage du courant. On peut également la convertir en énergie thermique par effet Joule et mesurer (calorimétrie) la quantité de chaleur produite. Enfin, les compteurs d'installation (compteurs Elihu Thomson), par exemple, utilisent les effets magnétiques (conversion électromécanique) du courant et mesurent le travail mécanique produit. Il est également possible de déterminer la quantité d'énergie transportée par un courant en mesurant ses effets chimiques (électrolyse).

L'énergie chimique est convertie en énergie calorifique (combustion), mécanique (moteur à explosion, arme à feu) ou électrique (pile et accumulateurs) et mesurée comme telle.

Les mesures absolues d'énergie rayonnante lumineuse se font par conversion de cette énergie en chaleur, puis en énergie électrique (bolomètre, cellules photo-électriques). On peut également utiliser la conversion de l'énergie des photons en énergie potentielle mécanique (radiomètre de Crookes pour la mesure de la pression de radiation).

L'énergie nucléaire est mesurée à partir de ses effets thermiques ou électriques (ionisation). L'énergie de masse se déduit immédiatement de la mesure de cette dernière grâce à la relation d'Einstein $E = mc^2$.

Il apparaît donc que la troisième méthode est très largement utilisée. Elle permet de se ramener à la mesure d'énergies (mécanique, thermique et électrique) facilement mesurables par l'une des deux autres méthodes.

L'énergie chimique

La forme d'énergie appelée énergie chimique est liée à la nature et à la composition des diverses substances qui nous entourent. Une substance quelconque est généralement formée de molécules toutes identiques s'il s'agit d'un corps pur ou différentes, dans des proportions plus ou moins variables, s'il s'agit d'un mélange. La structure de ce corps, son état dépendent des interactions qui existent entre chacune des molécules. Les molécules sont elles-mêmes constituées d'atomes, identiques dans le cas d'un corps simple (O_2,H_2, etc.), différents pour un corps composé.

La composition de ces molécules, leur stabilité ou leur fragilité dépend des liaisons interatomiques. Il importe donc d'être en mesure de déterminer la nature de ces liaisons. Celles-ci dépendent de la structure de l'atome, de la nature des interactions. Or, on sait maintenant qu'un atome est constitué d'un noyau (que le chimiste peut considérer comme étant sans structure) et d'un ensemble d'électrons. L'interaction électron-noyau n'est autre que l'interaction électromagnétique classique, celle qui s'exerce entre deux particules de charges opposées. Il s'ensuit par conséquent que les interactions atomiques et les interactions moléculaires sont elles-mêmes dues à cette interaction fondamentale qu'est l'interaction électromagnétique.

L'énergie chimique qui est emmagasinée dans les molécules peut être à ce titre considérée comme une énergie électrique. Lors d'une réaction chimique, qui est *une redistribution d'atomes en d'autres molécules*, il y a modification de la structure de ces molécules, donc de leur énergie électromagnétique potentielle. Cette variation peut apparaître sous diverses formes thermiques, mécaniques, etc., mais également directement sous forme électrique dans le cas des générateurs électrochimiques.

Les liaisons chimiques

La structure atomique, que nous supposons connue, ainsi que la classification périodique des éléments, permet d'expliquer les règles d'assemblage des atomes pour former des molécules. Plusieurs atomes s'uniront pour former une molécule si, par suite d'une nouvelle répartition des charges électroniques, l'énergie de la molécule est inférieure à la somme des énergies des atomes isolés. La molécule a emmagasiné une certaine quantité d'énergie, énergie qu'il faudra fournir pour briser cette molécule et restituer les atomes qui la constituent. Cette énergie d'interaction atomique est mise en évidence au cours d'une réaction chimique d'échange au cours de laquelle il y a dissociation de molécules, puis réassociation. C'est cette énergie que l'on appellera *énergie chimique*. On distingue généralement trois types de liaisons, les liaisons ionique, covalente et métallique.

Liaison ionique

Si la réaction de deux atomes neutres mis en présence se traduit au niveau des couches externes, ou couches de valence, par un transfert d'électrons d'un atome à l'autre, on dit que la liaison qui s'est établie pour former la molécule est une liaison ionique ou électrovalente. L'atome A qui a donné l'électron prend une charge positive et devient le cation A^+, l'atome B qui a reçu l'électron prend une charge négative et devient l'anion B^-. Un électron de l'atome A participe alors à l'environnement électronique de l'atome B, entre les ions A et B s'exercent des forces électrostatiques internes qui permettent la formation d'agrégat solide généralement de structure cristalline. La *figure* 1 schématise la formation d'une molécule de chlorure de sodium (Cl Na).

Les liaisons ioniques ne peuvent s'établir qu'entre atomes à faible potentiel d'ionisation (éléments des première et deuxième colonnes de la classification périodique) et atomes à forte affinité électronique (éléments des sixième et septième colonnes de la classification périodique).

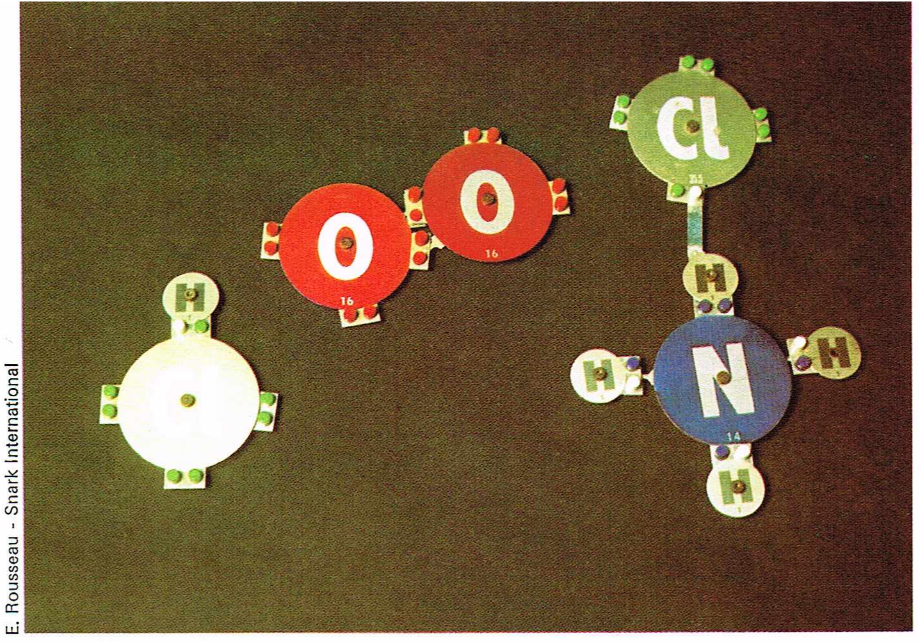
Liaison covalente

La liaison ionique ne peut, bien sûr, expliquer la formation de molécules telles que H_2 ou N_2 non plus que celles de nombreuses molécules organiques. G. N. Lewis, en 1916, a été amené à supposer que deux atomes (différents ou identiques) pouvaient mettre en commun des électrons célibataires pour former une ou plusieurs paires d'électrons (doublets). Ce processus devrait permettre aux atomes liés d'atteindre la configuration électronique stable des gaz rares, due à la présence d'une couche électronique externe complète. La liaison n'affecte pas les électrons des couches profondes. Le cas le plus simple de liaison covalente est celui des molécules diatomiques constituées par deux atomes identiques, par exemple H_2, Cl_2, etc. La liaison covalente peut être formée non seulement avec une seule paire d'électrons, comme dans les exemples cités *(liaison simple)*, mais aussi avec deux ou trois paires d'électrons, et les liaisons correspondantes sont alors appelées liaison double ou triple (*fig.* 2). Ainsi, les molécules O_2 et C_2H_4 correspondent à une liaison double.

La liaison covalente se manifeste ordinairement entre deux atomes de même espèce ou tout au moins très semblables entre eux. Cette liaison est extrêmement fréquente dans les composés organiques. La liaison covalente confère aux substances qui la contiennent les caractéristiques suivantes : elles sont *facilement fusibles et volatiles*, tout au moins tant que la masse moléculaire ne dépasse pas certaines limites, et elles ne conduisent pas le courant à l'état fondu ou en solution. Les molécules ainsi formées sont le plus généralement des molécules « polaires », la polarité étant due à la déformation du nuage électronique autour des noyaux, déformation qui peut être d'autant plus importante que les atomes qui forment la molécule ont des masses qui diffèrent sensiblement.

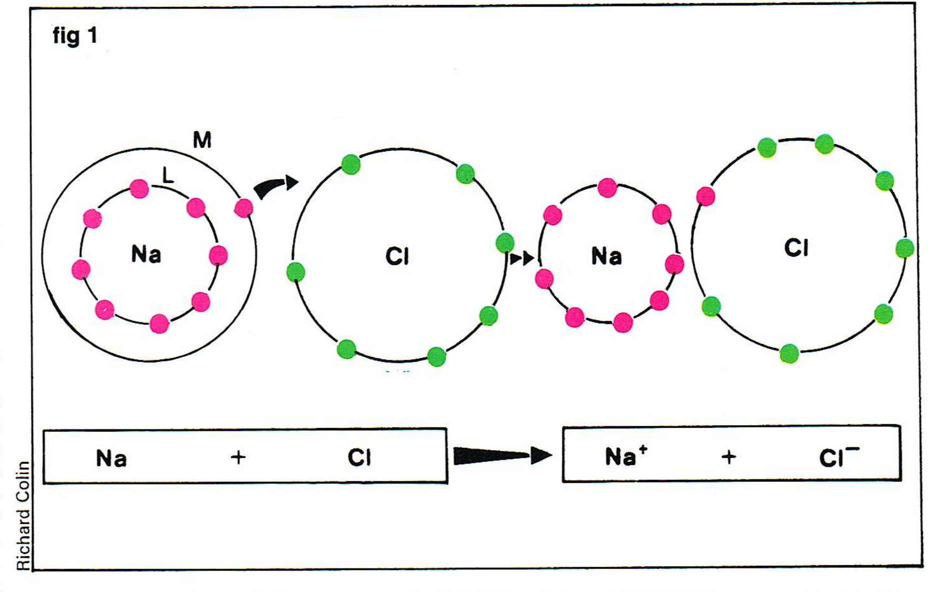
Liaison métallique

Cette liaison est assez complexe. Elle peut exister à l'état solide ou liquide. Les éléments à caractère métallique n'ont généralement que 1 ou 2 électrons périphériques, or l'expérience montre que ces métaux ont une structure simple, dense, et que chaque particule est entourée par 6 ou 8 particules. Ces résultats excluent la possibilité d'une liaison covalente, puisqu'il n'y a que 1 ou 2 électrons périphériques. Les propriétés physiques (point d'ébullition élevé, grande conductibilité électrique) excluent que les forces intermoléculaires puissent expliquer la cohésion du solide. En fait, on considère qu'il se forme un agglomérat polynucléaire important, les électrons périphériques participant à plusieurs liaisons (8 par exemple dans le cas du sodium qui a un électron périphérique). Les électrons, au lieu d'être localisés, forment en commun un nuage d'électrons, nuage qui peut être mis en mouvement par un champ électrique. Le métal a une bonne conductivité électrique, mais il

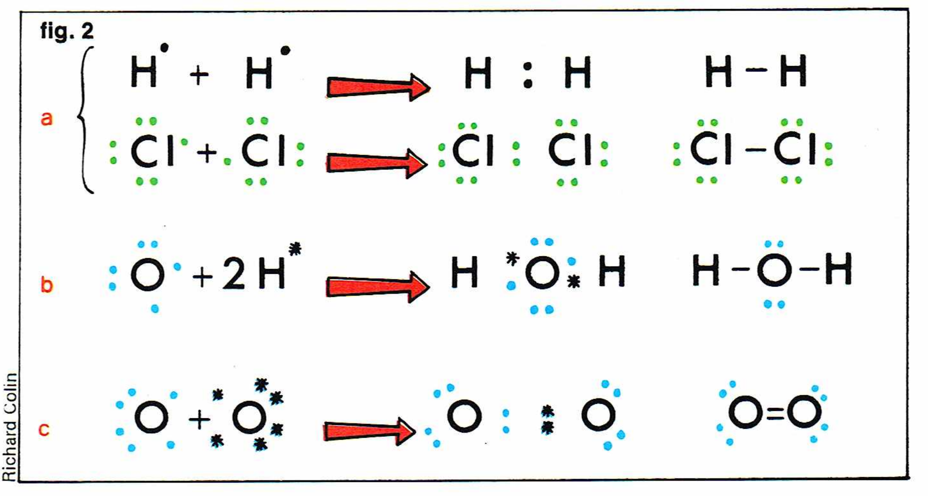


E. Rousseau - Snark International

▲ ***Quelques modèles de molécules schématisant les liaisons interatomiques responsables, lors de la dissociation et de la réassociation des molécules, de l'énergie chimique.***



Richard Colin



Richard Colin

est difficile d'arracher un électron au métal, puisque l'ensemble des ions positifs exerce sur les électrons des forces attractives. La grande conductibilité thermique des métaux est également due à l'existence de ce nuage d'électrons mobiles.

La liaison métallique est un peu moins forte que la liaison covalente, aussi un solide métallique a-t-il une bonne ductilité et une bonne malléabilité.

Interactions moléculaires

A côté des forces assurant la cohésion des atomes à l'intérieur d'une molécule, il existe des forces, appelées forces de Van der Waals, qui s'exercent entre les molécules. Ces forces, si elles ne peuvent être considérées en toute rigueur comme des liaisons chimiques, n'ont pas une origine différente. Elles résultent des combinaisons des forces de Coulomb entre les noyaux et les électrons, et elles consistent en des attractions et des répulsions. Les répulsions sont dues au nuage électronique, les attractions peuvent s'expliquer différemment selon la nature des molécules, plus précisément selon leur polarité. Ce sont ces interactions, leur intensité en particulier, qui sont responsables de la structure de la matière et des différents états dans lesquels elle peut se trouver à une température donnée.

Réactions chimiques

Une réaction chimique est un processus au cours duquel il y a transformation de matière. Par exemple, la combustion du bois est une réaction chimique dans laquelle le bois et l'oxygène de l'air se combinent pour donner de la vapeur d'eau, du dioxyde de carbone, etc. Il y a beaucoup d'autres exemples de réactions chimiques, parmi lesquelles on pourrait citer la corrosion, le durcissement du ciment, la fermentation, le développement de l'image latente se trouvant sur un film photographique exposé, etc. Il est à noter que le nombre d'atomes d'une espèce considérée est conservé au cours de la réaction. L'explication du mécanisme des réactions chimiques doit être recherchée dans la structure des molécules et donc des atomes des éléments mis en présence.

En effet, dans une molécule, les atomes sont liés par l'intermédiaire des électrons. Dans une réaction chimique, ces liaisons sont brisées par un apport d'énergie, et, simultanément ou non, de nouvelles interactions se développent, créant de nouvelles liaisons avec un dégagement d'énergie. Si l'énergie absorbée au cours de la rupture de liaison excède l'énergie dégagée au cours de la formation des nouvelles liaisons, globalement la réaction chimique absorbera de l'énergie. Elle sera dite endothermique. Dans le cas contraire, il y aura un dégagement d'énergie, la réaction sera dite exothermique. Dans quelques cas particuliers, les deux énergies peuvent s'équilibrer, la réaction sera dite *athermique*.

L'énergie échangée au cours de la réaction chimique est le plus souvent *thermique :* il y a alors absorption ou dégagement d'une quantité de chaleur.

Mais elle peut être également *électrique :* c'est, par exemple, le cas de l'électrolyse, processus dans lequel une réaction chimique (une oxydoréduction) se produit sous l'effet d'un courant électrique, ou encore le cas de piles, accumulateurs ou piles à combustibles dans lesquels une réaction d'oxydoréduction se traduit par la création d'un courant dans un circuit extérieur. Ce type de réaction est particulièrement intéressant, car il permet de mettre en évidence plus directement la nature électronique des liaisons chimiques, et il relie directement énergie chimique et énergie électrique.

Elle peut être *mécanique :* c'est le cas des réactions chimiques se produisant avec changement de volume.

Elle peut être *rayonnante :* c'est par exemple le cas de la décomposition des sels d'argent qui s'opère par absorption lumineuse. Dans ce type de réaction, un photon d'énergie bien déterminée est absorbé par la molécule et l'énergie qu'il lui cède sert à briser la liaison. De telles réactions sont appelées *photochimiques*.

Si une réaction endothermique ne peut se produire que par apport d'énergie thermique, les réactions exothermiques ou athermiques ne se produisent pas nécessairement spontanément, mais il faut généralement faire un apport initial d'énergie afin d'activer la réaction. Cette énergie d'activation peut elle-même être apportée à l'aide d'une autre réaction chimique exothermique. Considérons par exemple, la combustion d'un morceau de bois. Celui-ci, bien qu'étant au contact de l'oxygène de l'air, ne s'enflamme pas spontanément. Il faut, pour ce faire, apporter en un point, avec une allumette par exemple, une quantité de chaleur, c'est-à-dire une énergie suffisante pour que la réaction débute. Dès que la réaction a débuté, elle se poursuit. L'apport de cette énergie d'excitation se conçoit très bien dans la mesure où toute réaction chimique de réarrangement nécessite au préalable une rupture des liaisons. Cette rupture de liaison se fait lors du choc des molécules si l'énergie cinétique des molécules est assez élevée, c'est-à-dire si la température du milieu est assez grande. Lors de la recombinaison, il y a dégagement d'énergie cinétique pour les molécules issues de la réaction, donc d'énergie thermique pour le système. Les molécules peuvent à nouveau briser les molécules et permettre ainsi la propagation de la réaction. La propagation d'une réaction, quelle que soit sa nature, dépend d'un grand nombre de facteurs, en particulier la nature des réactifs, leur concentration, la température, la pression, etc.

Certaines réactions sont très lentes, d'autres, au contraire, très rapides; certaines peuvent présenter un caractère explosif. La combustion qui a lieu dans un moteur dit « à explosion » entre le combustible et l'air est certes très rapide mais elle l'est moins que dans la réaction chimique qui se produit dans des substances dites explosives comme la dynamite. Notons que, dans le cas du moteur à explosion, la combustion fait apparaître un dégagement de chaleur élevé et rapide qui correspond donc à une augmentation de pression, qui permet au gaz de repousser le piston. Il y a donc transformation de l'énergie chimique en énergie thermique (qui en fait, au niveau microscopique, est de l'énergie cinétique), puis transformation de cette énergie thermique en énergie mécanique.

Les générateurs électroniques

Les piles électriques, les accumulateurs et les piles à combustible possèdent la propriété de fournir directement de l'électricité à partir de réactions chimiques. Ils sont une illustration de la nature électronique des liaisons chimiques. Ces trois générateurs électrochimiques sont fondés sur les réactions d'oxydoréduction. Dans ces réactions, il y a simultanément une réaction d'oxydation, c'est-à-dire une réaction au cours de laquelle une substance perd des électrons et une réaction de réduction au cours de laquelle une autre substance gagne des électrons. La substance qui perd des électrons est appelée réducteur, celle qui en gagne est appelée oxydant. Il faut noter qu'il y a toujours simultanément une réaction d'oxydation et une réaction de réduction. Ces réactions sont réalisées entre deux électrodes baignant dans un électrolyte. Sur l'une des électrodes, la cathode, un oxydant est réduit grâce à un apport d'électrons, tandis que simultanément, sur l'autre électrode, l'anode, un réducteur est oxydé en libérant des électrons. Il y a donc transfert d'électrons d'une électrode vers une autre électrode et, si ces deux électrodes sont fermées sur un circuit extérieur, passage d'un courant. Que les électrodes soient fermées ou non sur un circuit extérieur, il y a création d'une différence de potentiel entre les deux électrodes. Si les électrodes ne sont pas fermées sur un circuit extérieur, la différence de potentiel entre les deux électrodes ne dépend que de la nature chimique des réactifs et plus particulièrement de l'énergie libérée lors du passage d'un électron d'une électrode à l'autre. Si les électrodes sont fermées sur un circuit extérieur, la différence de potentiel sera diminuée de la perte de tension due à la résistance interne du générateur.

On distingue généralement trois types de générateurs électrochimiques. Les piles ou générateurs primaires qui transforment leur énergie chimique en énergie électrique sans avoir la possibilité de revenir à leur état initial, les accumulateurs ou générateurs secondaires qui peuvent, une fois faite leur transformation énergie chimique-énergie électrique, revenir à leur état initial en subissant les réactions inverses si on leur fournit l'énergie électrique nécessaire, et les piles à combustible qui fonctionnent grâce à un apport permanent de réactifs aux électrodes.

Énergie nucléaire - Physique nucléaire

Partie centrale de l'atome, le noyau atomique a fait l'objet depuis une cinquantaine d'années de très nombreuses études et donné naissance à un nouveau type de physique, la « physique nucléaire ». Les physiciens nucléaires, sans être arrivés au terme de leurs recherches, ont à leur disposition un certain nombre de modèles qui permettent de décrire pour l'essentiel les caractéristiques des noyaux. Outre l'intérêt scientifique proprement dit, le noyau s'est révélé, et ceci dès 1940, une source possible d'énergie considérable appelée « énergie nucléaire » dont les réacteurs nucléaires à fission, les générateurs isotopiques d'énergie, voire les bombes nucléaires à fission ou les bombes thermonucléaires sont l'illustration (voir les chapitres de *Physique* correspondants).

Sources radio-actives d'énergie

Les isotopes radio-actifs constituent à l'heure actuelle des sources d'énergie courantes, fiables, et de longue durée. En effet, un gramme de radio-élément constitue à la fois un grand réservoir d'énergie et une très faible source d'énergie. Toutes les applications énergétiques des sources radio-actives découlent de cet apparent paradoxe. L'énergie est essentiellement libérée sous forme d'énergie cinétique par le rayonnement émis et par le recul des noyaux. La puissance P donnée par une source de 1 gramme d'un isotope de masse atomique M et de période T_a (en années) et émettant un rayonnement d'énergie E s'exprime sous la forme :

$$P = 2\,125 \frac{E}{MT_a} \text{ en watts}$$

l'énergie totale contenue dans cet échantillon est :

$$W = 26\,800 \frac{E}{M} \text{ en kWh}$$

La puissance décroît comme l'activité, et la moitié de l'énergie est délivrée en une période. Plus la période sera grande, plus la puissance délivrée sera faible, et la source aura une longue durée de vie. Remarquons par exemple que l'énergie contenue dans 1 gramme de $^{238}_{94}$Pu représente l'équivalent de 620 kWh, soit un millier de batteries d'automobiles classiques. L'énergie libérée sous forme de chaleur peut être convertie en électricité, à l'aide d'un thermocouple par exemple. Ainsi, depuis quelques années, certains stimulateurs cardiaques utilisent l'énergie fournie par une source de $^{238}_{94}$Pu.

De même, lors des missions *Apollo*, des générateurs isotopiques du même type, mais de plus forte puissance, ont été utilisés soit pour alimenter en énergie les nombreux appareils laissés en place sur le sol lunaire, soit pour réchauffer, pendant les nuits lunaires, les instruments sensibles au froid.

Signalons enfin que la chaleur dégagée dans les couches terrestres profondes serait due à la radio-activité.

Réactions nucléaires

L'étude d'un objet quelconque nécessite que l'on entre en rapport avec lui. Un moyen très simple d'entrer en rapport avec les objets stables qui nous entourent et dont les dimensions sont à notre échelle, est de les éclairer et de les regarder. L'exploration par diffusion d'un rayonnement sur l'objet est une méthode générale d'étude. Il faut, pour l'appliquer, disposer d'une source de rayonnement et être en mesure de détecter le rayonnement diffusé par l'objet et de l'analyser. C'est là tout le principe des réactions nucléaires, moyen essentiel de l'investigation des noyaux.

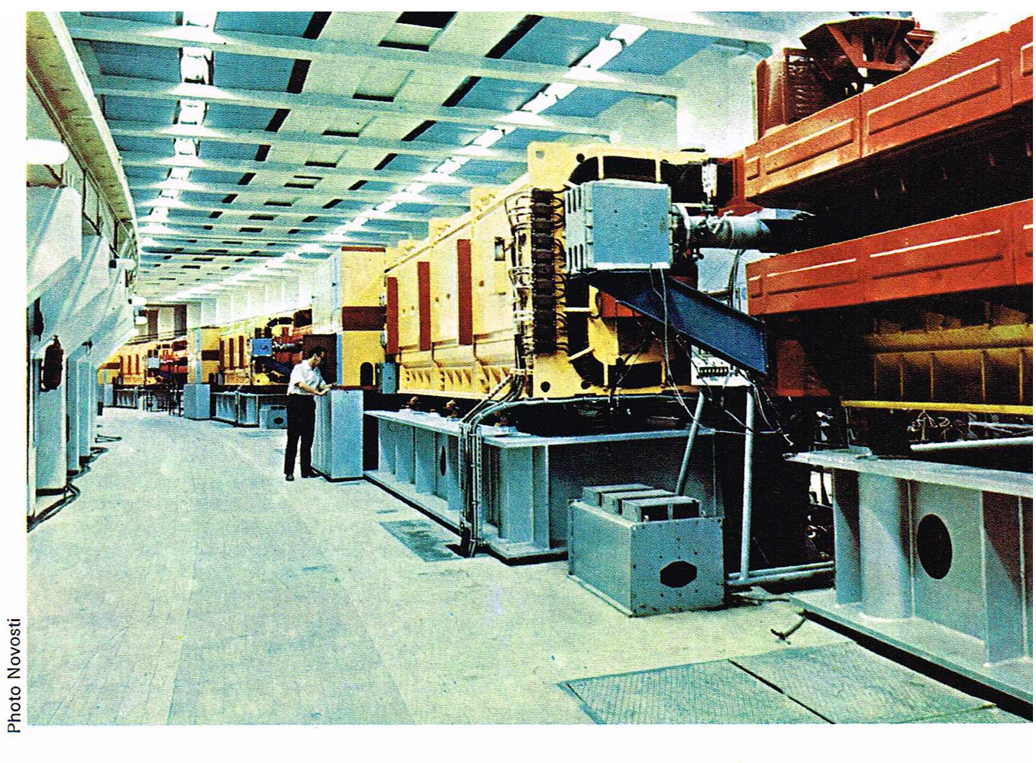
Mais on sait qu'un objet ne peut être observé à l'aide d'un rayonnement que si sa longueur d'onde est inférieure aux dimensions de l'objet. En ce sens, la lumière naturelle ne permet pas d'observer des objets dont la dimension est inférieure à $0{,}5 10^{-6}$ m. La mécanique ondulatoire de De Broglie a permis d'associer à un flux de particules de masse m et de vitesse v une longueur d'onde $\lambda = h/mv$, longueur d'onde qui sera donc d'autant plus petite que la masse et la vitesse du projectile seront grandes. Les faits suggèrent donc le remplacement de la lumière par des particules lourdes auxquelles on a donné une vitesse suffisante. De plus, si l'on veut étudier la structure d'un noyau, il faut pouvoir éventuellement la modifier, pouvoir arracher un nucléon ou un groupe de nucléons à ce noyau, le « casser »... Il faut donc pouvoir projeter sur ces noyaux des projectiles, qui ne sont autres que d'autres noyaux, possédant une énergie cinétique élevée. Ceci est fait à l'aide d'accélérateurs de particules qui utilisent les propriétés électrostatiques des noyaux.

S'il est évident qu'une réaction nucléaire permette d'obtenir des informations très précieuses sur le noyau, il faut néanmoins extraire des informations, « décoder » le message nucléaire.

Lorsqu'un noyau projectile atteint un noyau cible, divers processus sont possibles : le noyau projectile peut laisser le noyau cible intact et être seulement dévié de sa trajectoire, on dit qu'il y a diffusion élastique; il peut ne pas modifier la composition du noyau, mais modifier sa structure et la laisser dans un état excité, il y a alors diffusion inélastique. Il peut capturer un nucléon du noyau cible ou, au contraire, lui laisser un nucléon, etc. Bien d'autres processus sont possibles, chacun d'eux est caractérisé par une certaine probabilité de se produire que l'on appelle encore « section efficace » : c'est l'étude détaillée de ces sections efficaces, en fonction des noyaux cibles, projectiles, de leur énergie cinétique, etc., qui permet d'obtenir de précieux renseignements sur la structure nucléaire.

Il faut noter qu'une réaction nucléaire est au noyau ce qu'une réaction chimique est à la molécule. Alors que, dans le premier cas, il y a échange de nucléons, dans le second, il y a échange d'atomes. Une différence essentielle provient des énergies mises en jeu. Alors qu'elles sont peu importantes au cours d'une réaction chimique, faibles en tout cas devant l'énergie de masse, il n'en est pas de même pour une réaction nucléaire qui permet une vérification expérimentale précise de la relation d'équivalence masse-énergie $\Delta E = mc^2$.

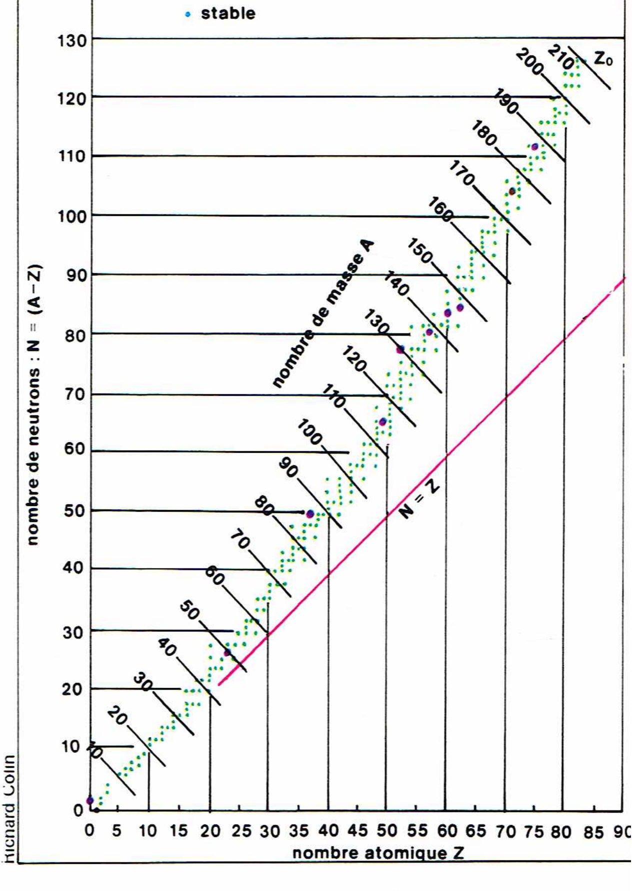
En effet, lors d'une réaction nucléaire, il y a redistribution des nucléons à travers plusieurs noyaux, donc modification des énergies de liaison et des énergies de masse des noyaux. L'énergie totale étant conservée au cours de la réaction, cette modification d'énergie de masse doit se traduire par la modification de l'énergie cinétique des noyaux qui ont interagi. Ce que l'on observe en mesurant l'énergie cinétique des particules issues de la réaction, l'énergie cinétique des particules initiales étant connue généralement. On appelle chaleur de réaction Q la différence de la somme des masses des noyaux avant réaction et de la somme des masses des noyaux après réaction. Cette chaleur de réaction est égale à la différence de la somme des énergies cinétiques des produits de réaction et de la somme des énergies cinétiques des noyaux qui ont provoqué la réaction. Les chaleurs de réactions dépendent, bien sûr, de chaque réaction mais elles sont de l'ordre du MeV.


Photo Novosti

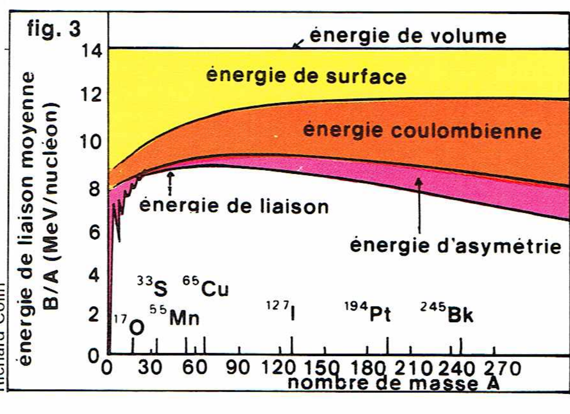
▲ ***Détail du protosynchrotron de Serpukhov (U.R.S.S.) d'une énergie de 70 BeV, mis en service en 1967.***

Fission nucléaire

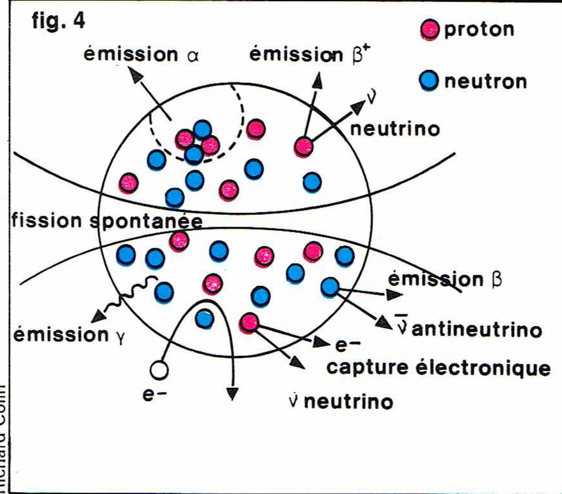
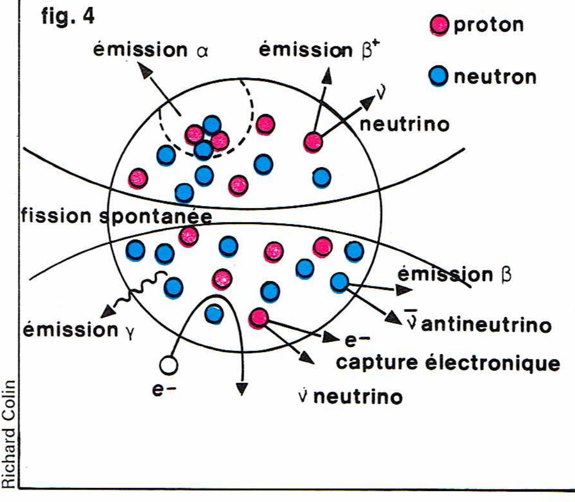
Il y a fission d'un noyau (généralement lourd) lorsque ce noyau se scinde en deux noyaux de masse voisine, la fission peut être spontanée, mais c'est un processus assez rare, les constantes radio-actives sont très faibles, ou induites lors d'une réaction nucléaire avec une particule légère incidente. La découverte de la fission est due à O. Hahn et F. Strassman en 1939. Son utilisation pour la production d'énergie a été proposée par F. Joliot-Curie. La *figure* 3, indiquant la variation moyenne d'énergie de liaison par nucléon, permet de voir qu'un tel processus est énergétiquement possible et peut libérer une énergie considérable. Dans la région de l'uranium (A ~ 240), l'énergie de liaison par nucléon est d'environ 7,6 MeV tandis que, dans la région A ~ 120, elle est en moyenne de 8,45 MeV. Si un noyau lourd se scinde en deux, il y aura production sous diverses formes d'une énergie de 240 (8,45 — 7,6) ≃ 200 MeV. D'autre part, compte tenu de la plus grande proportion de neutrons que l'on trouve dans les noyaux lourds, il y aura lors de la fission soit émission d'un certain nombre de neutrons, soit transformation de neutrons en protons par émission β^- des noyaux résiduels. Par exemple, lors d'une fission induite par des neutrons thermiques (neutrons dont l'énergie est celle communiquée par le milieu ambiant, soit environ 0,025 eV) sur $^{235}_{92}U$ (*fig.* 4). Il y a formation d'un noyau $^{236}_{92}U$ dans un état excité qui se scinde en deux noyaux de masse intermédiaire, quelques neutrons étant émis. Les noyaux résiduels ne sont pas toujours les mêmes. La fission peut se faire de diverses façons. La *figure* 5 représente la distribution des produits de fission. Le nombre de neutrons produits dépend de chaque processus. Il est en moyenne de 2,47 pour la fission de $^{235}_{92}U$ par des neutrons thermiques. L'excès de neutrons rend chaque fragment radio-actif. Il est à noter que les deux fragments n'ont pas des masses voisines, la fission n'est pas symétrique, les masses les plus probables se situant aux environs de A = 90 et A = 135.



▶ *Figure 5 : diagramme des noyaux stables existant dans la nature.*



▶ *Figure 3 : représentation graphique montrant que — en moyenne, l'énergie de liaison par nucléon est d'environ 8 MeV, énergie bien supérieure à l'énergie de liaison d'un électron autour d'un noyau (environ 10^6 fois) ; — l'énergie de liaison par nucléon est maximale au voisinage de A = 56. Pour les noyaux lourds (A > 100), ΔE/A est inférieur à 8,6 MeV et décroît régulièrement, ce qui signifie que les nucléons sont moins liés et qu'il faudra fournir relativement moins d'énergie pour briser ces noyaux. Pour les noyaux plus légers, ΔE/A décroît également régulièrement à l'exception de quelques noyaux dont le nombre de masse est multiple de 4.*

▶ *Figure 4 : divers processus de désintégration du noyau.*

Production d'énergie à partir de la fission - Principe des réacteurs nucléaires

La fission de l'uranium présente deux particularités permettant son exploitation pour la production industrielle d'énergie.

— Elle fournit une quantité importante d'énergie, essentiellement sous forme d'énergie cinétique des fragments de fission.

— Elle produit des particules identiques à celles nécessaires pour produire la réaction et en nombre supérieur. Chaque réaction de fission absorbe un neutron mais en produit en moyenne 2,5. Il y a donc une augmentation du nombre de neutrons dans le milieu, ce qui conduit à une réaction en chaîne.

En effet, si, à chaque génération, le flux de neutrons est multiplié par k, le flux total sera égal à :

$$1 + k + k^2 + ... + k^n$$

si k est supérieur à 1, on aura une réaction en chaîne. C'est sur ce principe de réactions en chaîne que sont fondés les réacteurs nucléaires ou les bombes nucléaires à fission appelées improprement bombes atomiques. Ce coefficient k est toujours néanmoins inférieur au nombre moyen de neutrons émis lors d'une fission. En effet, tous les neutrons émis lors d'une fission n'induisent pas eux-mêmes une fission. Ces neutrons peuvent par exemple :

— être absorbés par un élément du milieu lors d'une réaction de capture, qui n'est pas suivie de fission ;

— s'échapper du milieu fissile, la probabilité en est d'autant plus grande que le volume fissile est faible.

Pour que le facteur k soit supérieur à 1, la masse de matériau fissile doit donc avoir une dimension minimale dite *critique*, dépendant de sa constitution.

Si $k < 1$, les réactions en chaîne ne pourront se développer.

Si $k > 1$, les réactions en chaîne sont divergentes, le nombre de neutrons et le nombre total de fission augmentant exponentiellement.

Si $k = 1$, le réacteur est dit critique ou auto-entretenu, il fonctionne à une puissance constante limitée par la capacité d'extraction de la chaleur produite.

Pour faire démarrer un réacteur nucléaire, on le met dans des conditions légèrement surcritiques dans lesquelles des chaînes divergentes sont amorcées par des neutrons provoquant de la fission spontanée. Quand la puissance atteint la valeur voulue, on stabilise le fonctionnement en ramenant la réactivité k à la valeur 1, ce qui se fait à l'aide de barres de contrôle qui sont constituées de matériaux qui peuvent absorber les neutrons et que l'on introduit plus ou moins dans le cœur du réacteur.

Le premier réacteur nucléaire à avoir fonctionné fut celui mis au point par Fermi à Chicago et qui divergea le 2 décembre 1942.

Les bombes nucléaires à fission

Dans un réacteur, l'énergie libérée est contrôlée à l'aide de barres de contrôle de telle sorte que la réactivité k reste égale à 1. Si ce facteur est supérieur à 1, la réaction en chaîne se développe rapidement et il y a explosion. La bombe nucléaire à fission n'est pas autre chose qu'un petit réacteur à très fort coefficient de multiplication ; de plus, il faut que le temps qui sépare une génération de la suivante soit aussi court que possible (10^{-8} s), ce qui impose un combustible pur (235 U ou 239 P).

La fusion nucléaire

La fusion nucléaire est une réaction nucléaire résultant de la collision de deux noyaux atomiques légers suivie d'un réarrangement des nucléons qui les constituent pour former un noyau plus lourd. Comme l'indique la courbe moyenne donnant l'énergie de liaison par nucléon, ces réactions de fusion se produisent avec un dégagement d'énergie, puisque le noyau résultant de la fusion est généralement plus stable.

La fusion de deux noyaux de deutérium et de tritium qui s'exprime par la formule ci-dessous donne lieu à un dégagement d'une énergie de 17,6 MeV :

$$d + t \rightarrow \alpha + n + 17{,}6 \text{ MeV}$$

Cette énergie est considérable. En effet, la fusion d'un mélange en part égale de deutérium et de tritium pourrait libérer une énergie d'environ $2 \cdot 10^{24}$ MeV ou encore de $1{,}6 \cdot 10^{11}$ joules, énergie quatre à cinq fois supérieure à celle dégagée lors de la fission de 1 g de $^{235}_{92}U$.

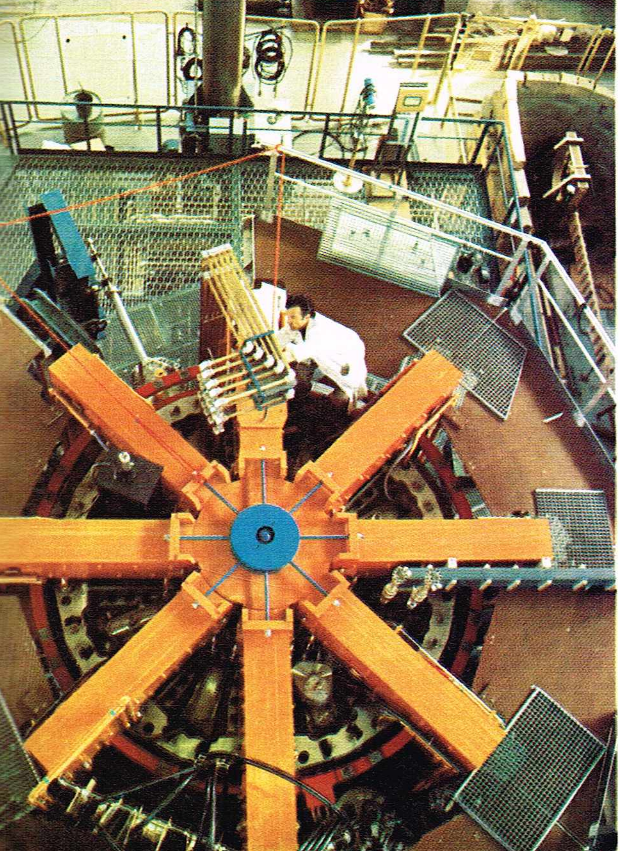
L'intérêt que l'on porte à l'étude des réactions de fusion tient à ce que l'on espère pouvoir, dans l'avenir, employer ce type de réaction pour la production d'énergie industriellement utilisable. L'élément essentiel que l'on espère pouvoir utiliser est le deutérium que l'on peut trouver en quantité pratiquement illimitée, puisque l'eau naturelle contient environ en poids 1/6 000 d'eau lourde. Si donc on parvenait à produire, maîtriser et contrôler la fusion d'atomes de deutérium, le problème de l'épuisement futur des gisements de combustibles fossiles conventionnels serait résolu. Dans la nature, de telles réactions sont à l'origine de la production d'énergie dans le Soleil, et d'une façon plus générale dans les étoiles.

La fusion nucléaire contrôlée

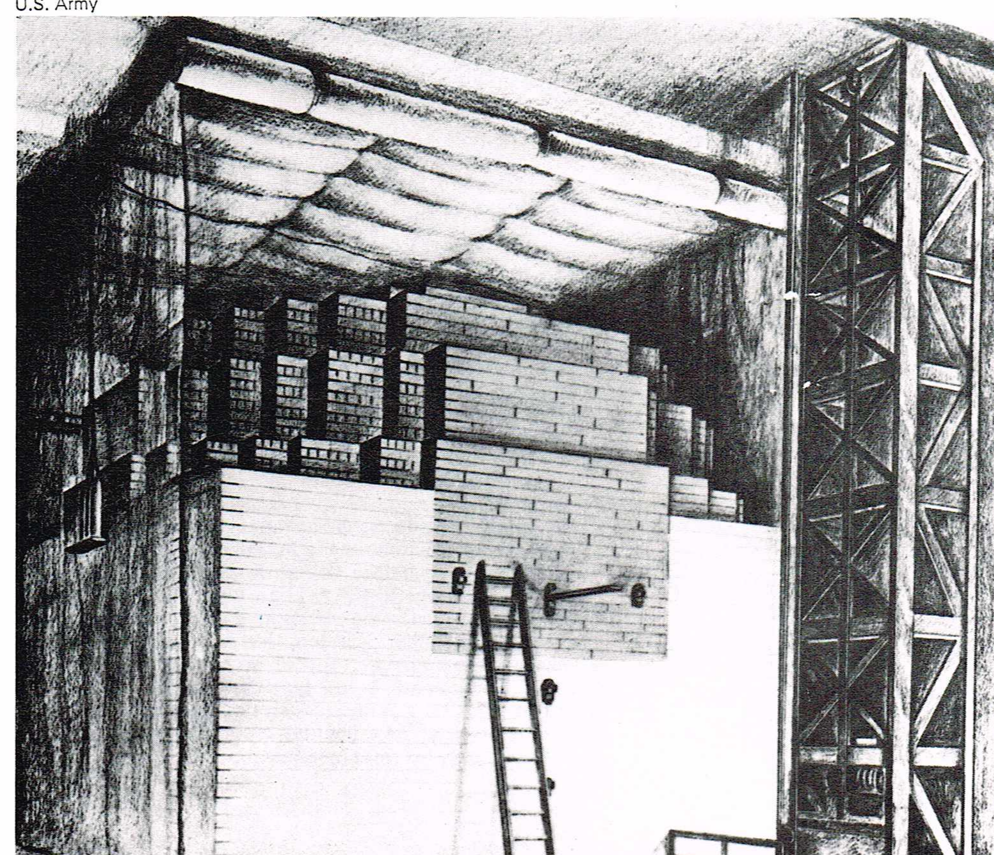
De nombreux problèmes restent cependant à résoudre pour récupérer ainsi de grandes quantités d'énergie, dues pour l'essentiel à la nature de l'interaction nucléaire. En effet, les forces nucléaires qui assureront la cohésion du nouveau noyau résultant de la réaction de fusion ont un rayon d'action faible vis-à-vis des forces de répulsion électrostatique qui constituent un obstacle au rapprochement des deux noyaux initiaux. Le problème est donc de communiquer aux noyaux que l'on veut réunir une énergie suffisante pour qu'ils puissent vaincre la répulsion électrostatique. Celle-ci dépend bien sûr des noyaux initiaux, elle est minimale si ceux-ci sont des isotopes de l'hydrogène (0,15 MeV environ pour la fusion deutérium-tritium). Pour communiquer cette énergie cinétique aux noyaux fusibles, on utilise l'agitation thermique. Il faut donc porter le mélange de nucléides destinés à fusionner à très haute température (une énergie cinétique de 0,01 MeV correspond à une température de $1{,}16 \cdot 10^8$ °K). L'énergie des chocs dus à l'agitation thermique peut suffire à provoquer les premières fusions. L'énergie cinétique des noyaux produits au cours de ces premières fusions est transmise à l'ensemble, augmentant ainsi la température, c'est-à-dire l'agitation globale des noyaux, donc les chances de nouvelles fusions. C'est donc grâce à l'agitation thermique que les réactions de fusion se trouvent naturellement entretenues, d'où le nom de *réaction thermonucléaire*. (Il faut noter que le principe d'amorçage et d'entretien de ces réactions de fusion est tout à fait semblable à celui d'une simple réaction chimique, par exemple une combustion.) Or, à ces températures, les noyaux sont libérés de leur enveloppe électronique et la matière est à l'état de *plasma*. Ce plasma ne peut être contenu comme un gaz ou un liquide dans une enceinte, mais il doit être maintenu isolé dans l'espace loin des parois. En effet, même si celles-ci pouvaient supporter de très hautes températures, elles constitueraient une source de refroidissement empêchant l'auto-entretien des réactions de fusion. En confinant le plasma dans un champ magnétique, on peut empêcher les particules d'aller frapper les parois de l'enceinte du réacteur à fusion et maintenir une densité suffisante pour que les réactions de fusion entre les noyaux soient assez nombreuses et libèrent plus d'énergie qu'il n'en a fallu pour amorcer la réaction. Les dispositifs de confinement de plasma, actuellement étudiés, utilisent des techniques diverses ; l'un des plus prometteurs semble être le dispositif Tokamak mis au point par L. Artsimovitch à l'institut Kurchatov près de Moscou.

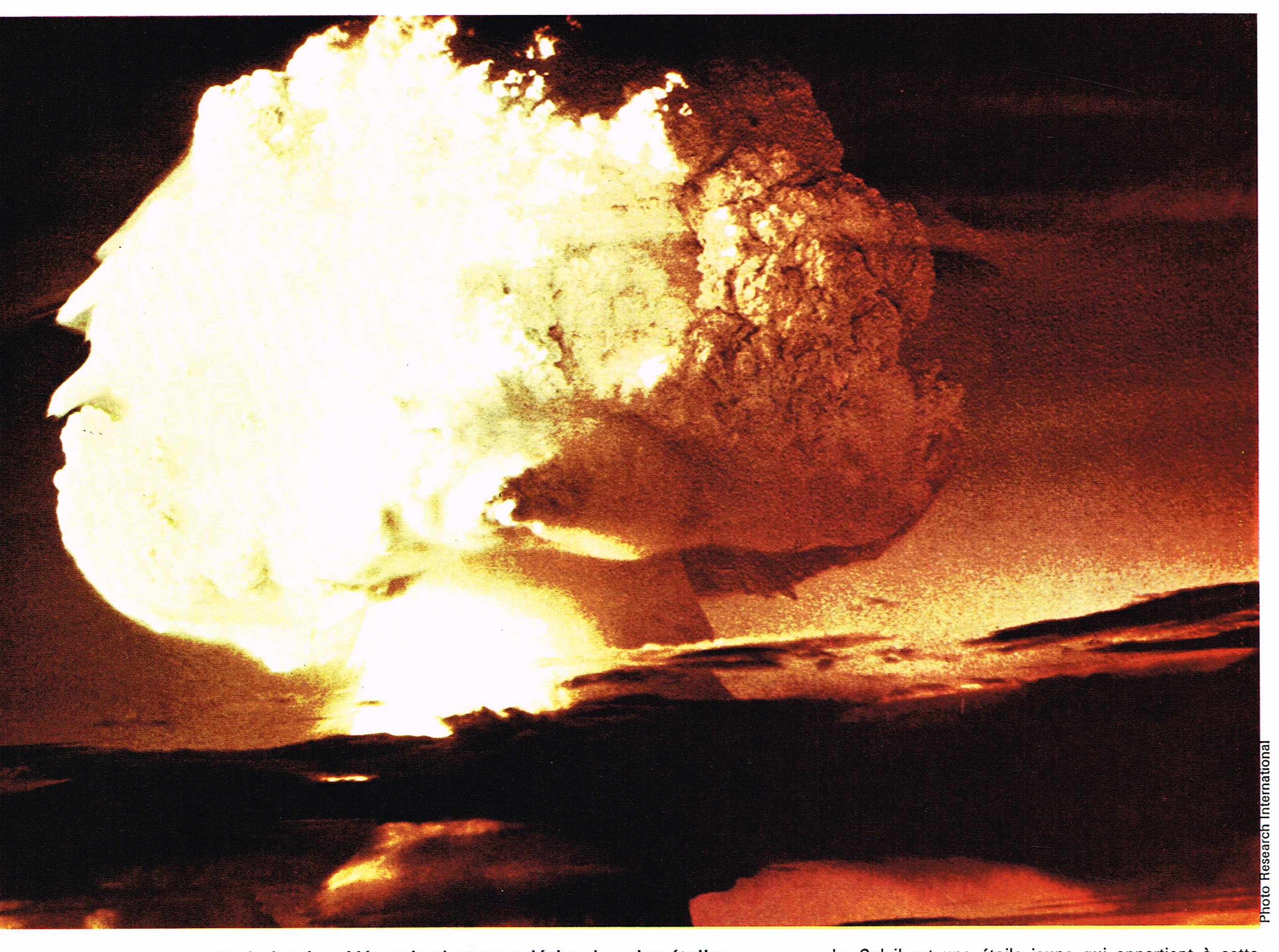
▼ *A gauche, le* Tokamak : *dispositif expérimental de fusion thermonucléaire contrôlée utilisant la technique de confinement de plasma.*
A droite, gravure reproduisant la pile de Fermi qui divergea à Chicago le 2 décembre 1942.

Doisneau - Rapho



U.S. Army





▲ *Explosion de la première bombe thermonucléaire, en 1952, aux îles Marshall.*

L'énergie thermonucléaire dans les étoiles et le Soleil

Si l'homme ne sait pas encore maîtriser la fusion thermonucléaire, c'est pourtant de beaucoup l'énergie la plus abondamment libérée dans l'Univers. Le Soleil comme les étoiles sont le siège de réactions thermonucléaires permanentes. Les théories couramment admises concernant la naissance des étoiles supposent qu'une étoile naît lorsqu'une certaine quantité de masse interstellaire parvient à s'isoler en se contractant sous l'action de son propre champ gravitationnel. Cette contraction s'accompagne d'un échauffement du gaz au centre de l'étoile. La température et la densité peuvent alors être suffisantes pour que la fusion des protons commence à s'y produire, se développe et donne comme produit final des noyaux d'hélium. Durant la période de combustion de l'hydrogène, la contraction gravitationnelle de l'étoile s'arrête, sa température se stabilise entre 10 et 30 millions de degrés selon la masse de l'étoile. Lorsque l'hydrogène est épuisé, les réactions thermonucléaires s'arrêtent et la contraction gravitationnelle reprend jusqu'à ce que l'élévation de température soit suffisante pour que l'hélium brûle à son tour ($2\ 10^8$ °K). Le cycle de l'hélium étant fini, il y a ensuite combustion d'éléments plus lourds, carbone, oxygène... La température augmente avec la masse du combustible ; chacun de ces cycles de combustibles correspond à un type particulier d'étoiles, les étoiles dites de « la séquence principale » pour la fusion de l'hydrogène, les « géantes rouges » pour la fusion de l'hélium, puis les supergéantes, etc.

Le Soleil est une étoile jeune qui appartient à cette première catégorie. Au centre du Soleil, on estime que la température est de l'ordre de 20 millions de degrés, sa densité d'environ 10^{27} électrons par cm^3, la pression de 10^{11} atmosphères. A chaque seconde, 570 millions de tonnes d'hydrogène sont consommées, ce qui, compte tenu de la masse du Soleil, lui donne une durée de vie de 10^{10} ans environ pour le cycle hydrogène.

Bombes H ou bombes thermonucléaires

Les bombes H ou bombes à hydrogène utilisent la fusion thermonucléaire. Le principe de ces bombes, mises au point à partir de 1950, est simple. Un mélange de deutérium (^2_1H), tritium (^3_1H) et lithium (^6_3Li) est porté, en très peu de temps (environ 1 microseconde), à très haute température par l'explosion d'une petite bombe à fission, qui joue le rôle de l'allumette. L'inertie des noyaux fussibles suffit à les maintenir confinés et un certain nombre de réactions thermonucléaires se produisent.

Les bombes H développent des énergies énormes ; alors que la puissance des bombes à fission est limitée, celle des bombes à fusion ne l'est pas, car une fois la réaction amorcée et l'énorme température atteinte, les noyaux fussibles continuent d'entrer en réaction, même s'ils se dispersent. Outre la puissance, une caractéristique importante des bombes H est, contrairement aux bombes à fission, la non-production de noyaux radio-actifs à longue durée de vie. C'est ce qu'on appelle une « bombe propre ».

Historique

L'énergie humaine

Dans les premiers temps de son évolution, l'homme ne disposait que de sa seule énergie physique pour assurer sa survie au sein d'une nature hostile où se manifestait la capacité énergétique de l'Univers. Observant avec frayeur les effets de la force des eaux et du vent, les immenses incendies allumés par la foudre, l'homme, impuissant à maîtriser ces énergies naturelles qui se déchaînaient librement, a commencé par améliorer les conditions d'utilisation de son potentiel énergétique.

Dès l'époque paléolithique, l'être humain s'est manifesté comme un faiseur d'outils, selon le mot de Benjamin Franklin. Cette faculté particulière le différenciait des autres créatures vivantes qui peuplaient alors la Terre. Les objets rudimentaires qu'il fabriquait, à partir de branches ou de pierres ramassées sur le sol, complétaient ses mains, donnaient plus d'efficacité à ses gestes lorsqu'il avait à lutter contre les animaux soit pour se nourrir, soit pour se défendre. Peu à peu, ces outils primitifs devinrent plus élaborés, l'homme sut tirer profit des observations qu'il faisait pour concevoir des instruments, qui ne furent plus seulement un prolongement de son bras, mais qui lui permirent de multiplier la puissance de ses muscles.

L'apparition de ces premiers outils diminua l'effort que l'être humain devait fournir pour la cueillette et la chasse, essentielles à sa nourriture. L'économie d'énergie ainsi réalisée alla en augmentant au fur et à mesure que les techniques se perfectionnèrent, et permit à l'homme de se consacrer à d'autres tâches et, en libérant son esprit, de tirer profit de l'observation expérimentale de son environnement.

La légende veut que la conquête du feu soit l'élément initiateur du développement de l'humanité. Le rapt du feu qui, dans les mythes primitifs, est la cause des tourments mais aussi du pouvoir de l'homme, a sans doute été un profond stimulant pour l'intelligence de l'être humain, mais il semble plus réaliste de penser que la connaissance du feu fut une conséquence des constatations que firent les premiers artisans en façonnant des pièces de silex ou en frottant l'un contre l'autre deux morceaux de bois.

L'ingéniosité technique et la découverte du feu ont permis à l'homme d'agir sur son environnement ; le feu, en particulier, lui donne la possibilité de transformer les matériaux. C'est donc la capacité d'employer les deux premières formes d'énergie dont elle a pu disposer qui a apporté à l'humanité les armes qui devaient lui permettre de dominer le monde.

Pendant plusieurs siècles, en dépit de l'évolution des techniques et des connaissances sur les phénomènes naturels, l'énergie humaine resta le moyen principal de production du travail. L'exploitation d'autres sources d'énergie comme l'énergie éolienne ou l'énergie hydraulique fut possible techniquement très tôt. Le premier usage de la force du vent, probablement associé à l'invention de la voile, se perd dans la nuit des temps, et l'on peut penser que l'homme primitif sut employer à certains travaux la puissance du courant de certaines rivières.

Les Égyptiens, les Grecs et les civilisations orientales anciennes ont fait preuve d'un génie inventif qui leur ont fait pressentir les possibilités offertes par les sources d'énergie que nous connaissons actuellement. Nous parlerons plus loin de certaines des découvertes de l'Antiquité qui, tombées dans l'oubli pendant longtemps, paraissent maintenant prémonitoires. A quoi peut-on attribuer cette stérilité relative des inventions de l'Antiquité, en particulier de la civilisation grecque ? D'une façon générale, les réalisations techniques des Anciens servirent plus à assouvir la curiosité scientifique ou à augmenter la puissance guerrière qu'à diminuer le travail humain. Cela tient probablement au fait que la société antique disposait avec l'esclavage d'une source importante d'énergie. La suppression de l'esclavage paraissait alors impossible et les Anciens, jusqu'à la fin de l'Empire romain, ont considéré l'esclavage comme normal. La nécessité d'envisager le recours à l'emploi intensif d'autres sources d'énergie ne se justifiait donc pas à leurs yeux. Les Romains poussèrent à l'extrême cette conception en étendant sans mesure l'esclavage au fur et à mesure de leur conquête, faisant ainsi main basse sur le potentiel énergétique des autres nations. Les excès de Rome et l'avènement du christianisme entraînèrent une réflexion sur le rôle de l'esclave qui fit peu à peu prendre conscience du caractère inacceptable de la condition servile. Cette première crise de l'énergie, prélude à la décomposition de l'ordre romain, est un des facteurs qui ont entraîné la régression sur le plan des connaissances scientifiques et techniques que l'on a connue par la suite.

Une source d'énergie importante : l'animal

On a tendance à négliger à l'heure actuelle le rôle important tenu par les animaux de trait en tant que source d'énergie susceptible d'accomplir un travail mécanique. Pourtant la bête de somme reste encore, dans certains pays en voie de développement, le moteur essentiel des outils agricoles ou des moyens de transport.

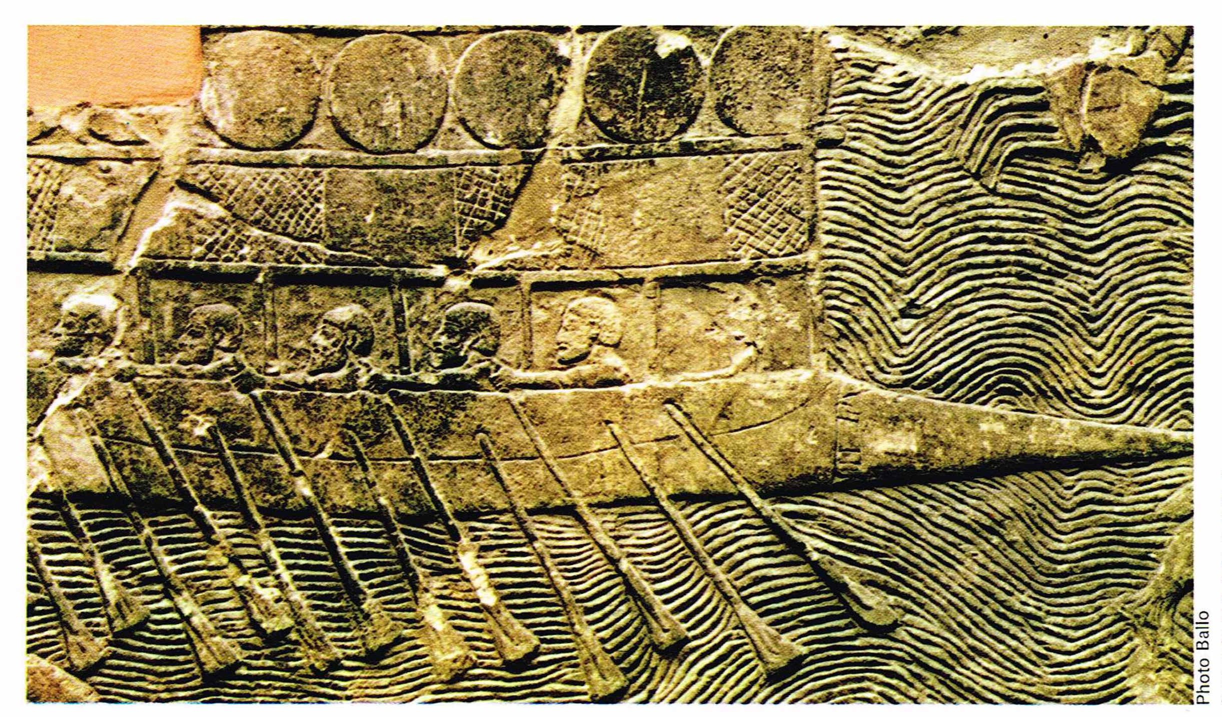
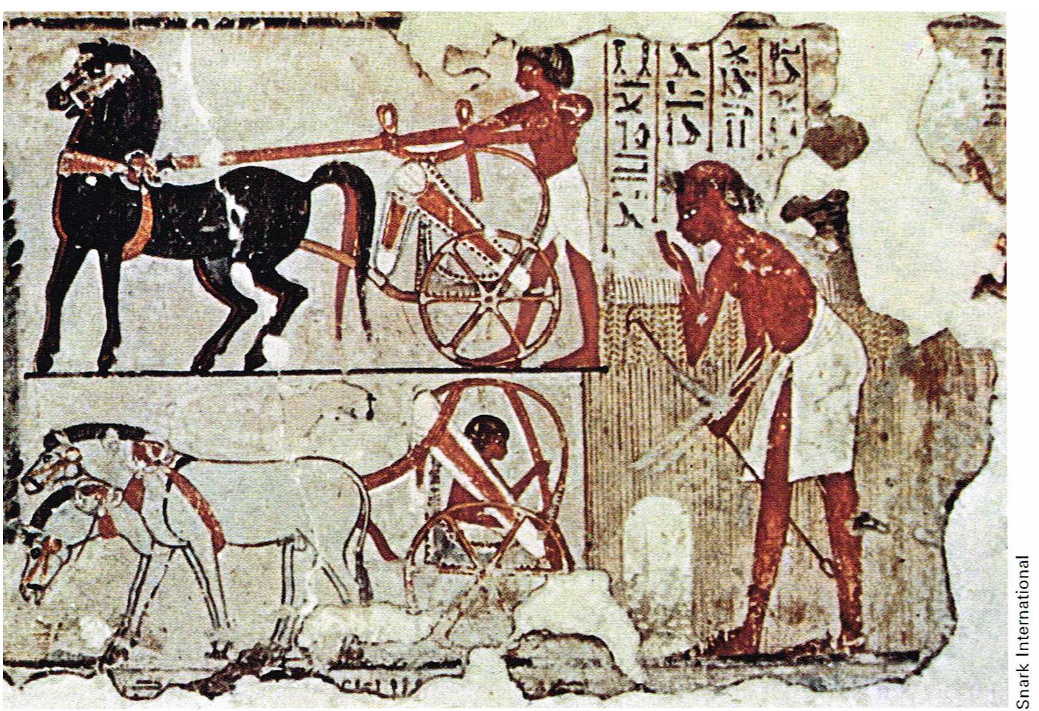


Photo Ballo

◄ La société antique disposait avec l'esclavage d'une source importante d'énergie. Ici, un bas-relief représentant un navire de guerre chargé de défendre les routes commerciales des Phéniciens, qui, vers la fin du XIe siècle av. J.-C., dominaient la Méditerranée occidentale.



Snark International

▲▼ *Les représentations anciennes des véhicules tirés par des animaux montrent l'évolution des procédés d'attelage : en haut, sur cette fresque picturale égyptienne représentant l'impôt sur les récoltes, une bande de cuir enserre le cou du cheval ; en bas, sur ce frontispice d'un manuscrit du XVIe siècle, on observe la forme moderne d'attelage qui libère la gorge de l'animal.*

Bulloz

Les forces animales n'ont servi pendant les premiers temps historiques que de complément à l'énergie humaine ou bien ont été employées à l'exécution de tâches particulières (tirer les chars de guerre par exemple). L'examen des représentations anciennes de véhicules tirés par des animaux montre que les procédés d'attelage utilisés dans l'Antiquité ne permettaient pas d'obtenir de l'animal un effort considérable : une bande de cuir souple lui enserrait le cou, gênant ainsi considérablement sa respiration. La diminution du potentiel énergétique humain, liée à la disparition de l'esclavage mais aussi aux ravages des guerres qui dévastèrent le monde, a incité à l'étude de l'amélioration du rendement de l'énergie animale, ainsi d'ailleurs que des autres sources d'énergie connues à l'époque. Vers la fin du Xe siècle, on voit apparaître la forme moderne de l'attelage qui libère la gorge de l'animal et lui permet d'exercer son effort dans de meilleures conditions. L'Asie semble avoir connu dès le IIIe siècle une technique d'attelage plus élaborée que la technique ancienne.

Cette invention fut suivie d'autres qui en multiplièrent les effets : l'attelage en file qui semble inconnu de l'Antiquité fut mis au point et systématiquement appliqué au Moyen Age. Les améliorations apportées aux routes et aux véhicules contribuèrent à l'amélioration des conditions d'utilisation de l'énergie animale qui resta, en particulier dans l'agriculture, la source principale du travail mécanique pendant plusieurs siècles.

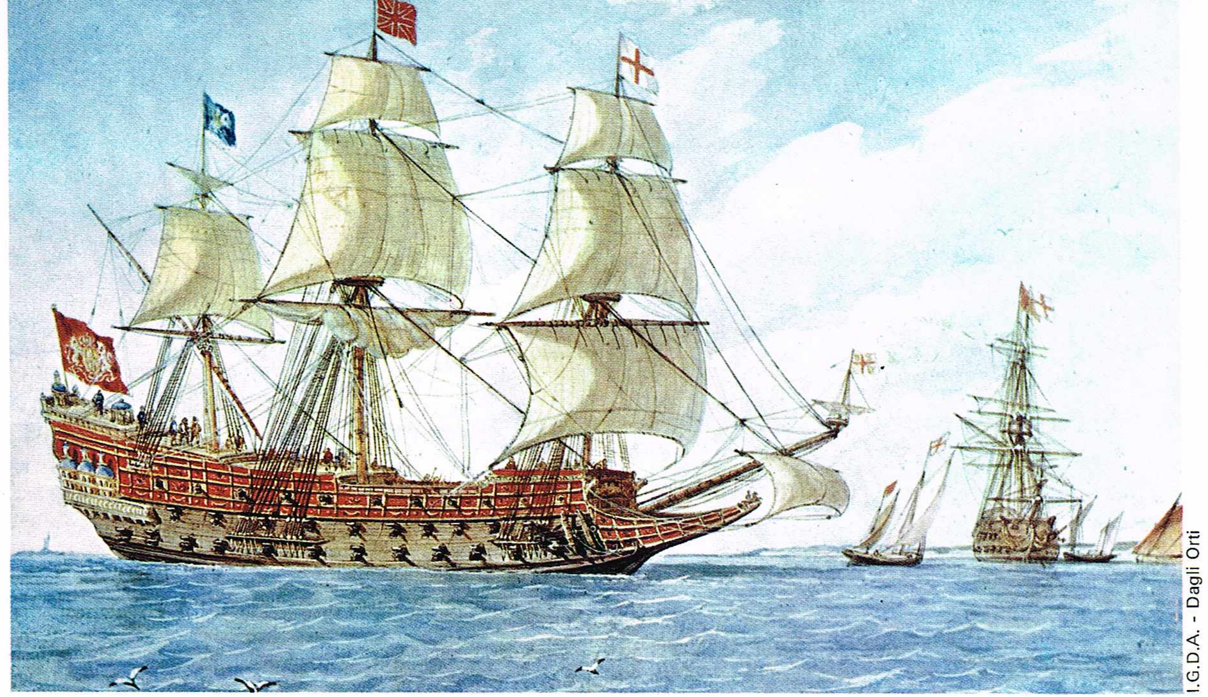
Le vent et l'eau

Le premier moteur qui ne fut pas un être vivant et qui utilisait donc une source d'énergie naturelle autre que l'homme ou l'animal, fut la voile. On ne sait pas qui a eu un jour l'idée ingénieuse de tendre un morceau de toile au-dessus de son esquif pour capter les forces du vent. La plus vieille représentation de la voile que l'on connaisse est un dessin égyptien, vieux de cinq mille ans, où une voile rectangulaire est montée sur un mât placé à l'arrière du navire. En dépit de cela, il semble que pendant très longtemps la voile fut plus un moteur auxiliaire et que l'énergie motrice la plus employée resta celle des bras des rameurs.

La domestication de la force motrice du vent pour d'autres usages que la propulsion des bateaux ne débuta véritablement qu'au Moyen Age, et les premiers moulins à vent n'apparurent qu'au XIIe siècle. Il est vrai que le problème technique qu'ils posaient était difficile à résoudre pour l'époque : il fallait en effet trouver un système qui permette de présenter constamment les ailes au vent. Les plus anciens moulins à vent tournaient tout entiers autour d'un pivot central fixé au sol.

Le perfectionnement de la construction navale et des techniques de gréements assura un développement de la propulsion à voile qui resta jusqu'à l'avènement de la machine à vapeur sans concurrence. Maintenant les moulins à vent ont disparu de nos campagnes et la voile ne sert plus qu'aux plaisanciers, qui préfèrent utiliser le vent plutôt que les moteurs bruyants et polluants pour profiter des joies de la navigation. Néanmoins, l'exploitation de l'énergie éolienne va peut-être connaître un certain renouveau devant les problèmes posés par la demande croissante d'énergie, alors que les ressources en combustibles diminuent. En particulier, l'étude de la production d'électricité à partir d'éoliennes identiques à celles que l'on a utilisées dans le passé pour pomper l'eau des puits profonds se développe, car elle permet d'envisager la fourniture d'électricité dans des pays déshérités où l'absence de houille blanche et de ressources pétrolières rend difficile l'installation de centrales thermiques ou hydrauliques.

Un siècle avant Jésus-Christ, un artisan habile eut l'idée de construire une roue à aubes horizontale qui, placée dans le lit d'un cours d'eau, se mit à tourner sous l'action du courant. Il suffisait d'y associer une meule pour que le grain fût moulu sans effort. Ce dispositif, appelé la roue normande, est le prototype de tous les moulins à eau et le précurseur des turbines hydrauliques modernes qui sont l'élément essentiel des centrales hydro-électriques. Jusqu'alors, le meulage du grain se faisait à l'aide d'une meule tournante mue par l'homme, le cheval ou l'âne, et l'invention du moulin à eau apparut comme un facteur important de libération, car le travail



◀ *Le perfectionnement de la construction navale et des techniques de gréements assura à la propulsion à voile un règne sans concurrence jusqu'à la machine à vapeur. Ici, le* Souverain des mers, *navire anglais lancé en 1637, était le plus grand et le plus armé des bateaux de guerre de son temps (Musée naval, Madrid).*

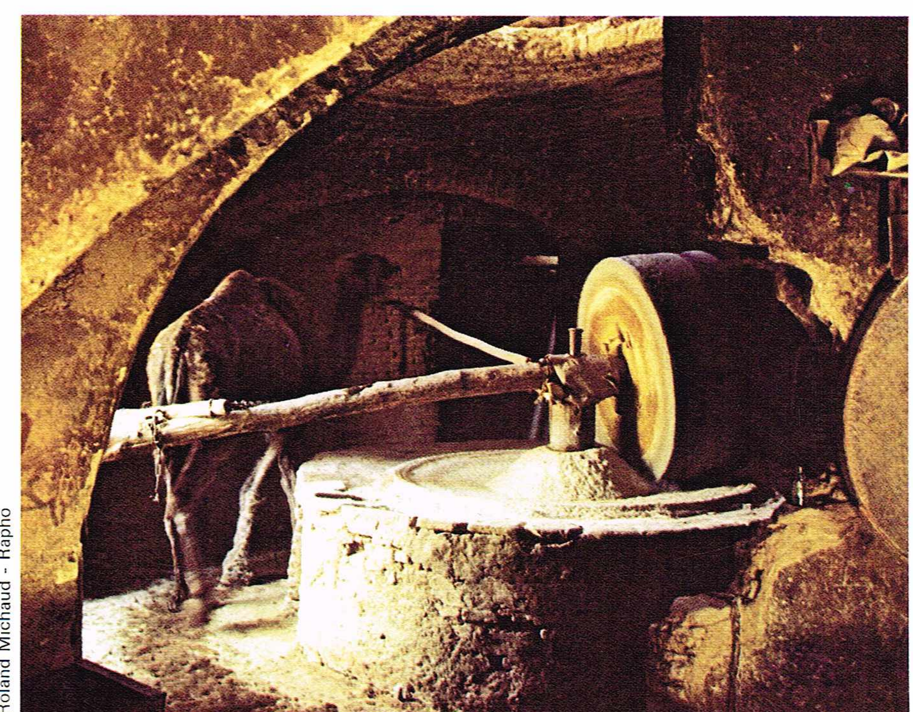
I.G.D.A. - Dagli Orti

consistant à moudre le grain était considéré comme un des plus durs et des plus monotones. Le poète grec a chanté le moulin à eau dans des termes très élogieux.

La transformation de la roue normande en roue vitruvienne (du nom de l'architecte romain Vitruve), qui n'est plus placée horizontalement dans le lit du courant mais mise verticalement, eut lieu au cours du Ier siècle avant l'ère chrétienne. Cette roue connut une succession de perfectionnements qui en améliorèrent le rendement et permirent de l'adapter aux différents types de cours d'eau.

L'énergie hydraulique fut très utilisée jusqu'à l'avènement de la machine à vapeur, non seulement pour moudre le grain, mais aussi pour actionner les machines à scier le bois, les pressoirs, etc. Source d'énergie d'un emploi facile, plus stable que le vent, ne coûtant rien, elle présentait quelques inconvénients qui limitèrent son champ d'applications : la puissance prélevée sur le courant est très faible, le mouvement obtenu est souvent très lent, il n'est pas possible de transmettre cette énergie sur des distances assez grandes, ce qui impose à l'utilisateur de s'implanter à quelques mètres du bord de la rivière. C'est seulement dans le deuxième tiers du XIXe siècle, quand fut mise au point la turbine à eau que nous connaissons actuellement et que l'on sut aménager les chutes d'eau pour répondre au besoin de l'industrie électrique, que les possibilités énergétiques de l'eau furent véritablement exploitées.

Si les moulins à eau ne sont plus que des curiosités touristiques dans les pays qui ont atteint un haut degré de technicité, ils sont encore d'un emploi assez répandu dans certaines régions du monde, l'Asie par exemple.



Roland Michaud - Rapho



Roland Michaud - Rapho

▼◀ *Le meulage du grain (en haut, en Iran) ou la noria (ci-contre, au Turkestan) ont traversé les âges jusqu'à nos jours; dans certains pays le progrès n'a porté que sur le remplacement de l'homme par le chameau, l'âne ou le cheval.*



J. Nance - Magnum

▲ *Le feu, connu dès les premiers âges de l'humanité, n'utilisa jusqu'au XVIIIe siècle que le bois comme combustible essentiel.*

De la conquête du feu à la machine à vapeur

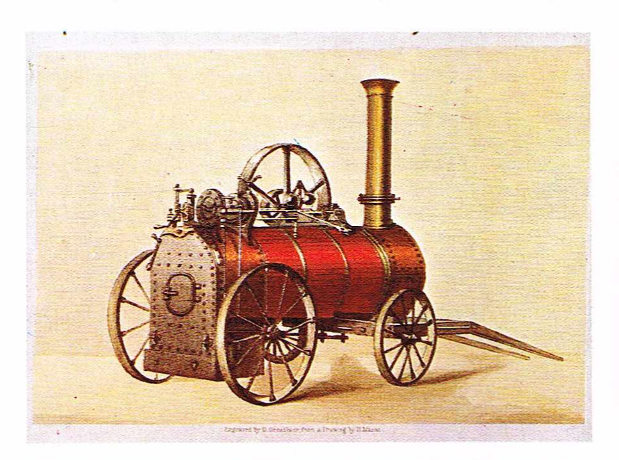
Le feu fut connu dès les premiers âges de l'humanité ; il fut utilisé très tôt pour la cuisson des aliments et le chauffage, mais aussi pour la cuisson des poteries et le travail du métal. Si l'on s'en tient à la première définition de l'énergie : capacité d'effectuer un travail mécanique ; l'énergie thermique ne fut employée que très tardivement, après de nombreux tâtonnements. La correspondance entre le travail mécanique et la chaleur était connue expérimentalement dès l'Antiquité, mais son étude scientifique n'a réellement débuté que vers le début du XVIIIe siècle. Pourtant, l'ingéniosité grecque est à l'origine du premier dispositif connu fonctionnant à la vapeur : l'éolipile d'Héron d'Alexandrie. On cite souvent comme invention annonciatrice de la turbine à vapeur la machine de Branca, mécanicien et architecte italien, qui imagina sa machine aux environs de 1629. Ces inventions, quoique spectaculaires, restèrent isolées et ne semblent pas avoir incité les chercheurs à se pencher sur cette possibilité de conversion de l'énergie thermique en énergie mécanique. En 1685, sir Samuel Morland, maître mécanicien du roi Charles II, écrit dans un rapport : « Lorsque l'eau est vaporisée par le feu, la vapeur ainsi obtenue occupe un espace beaucoup plus grand que l'eau, et, plutôt que de rester emprisonnée, elle fait exploser la pièce d'artillerie dans laquelle elle est confinée. Mais si l'on sait comment la dominer, elle accepte de travailler sans regimber comme un cheval docile et peut ainsi être d'une grande utilité pour le genre humain. » Ces paroles prophétiques, qui annonçaient la machine à vapeur, furent énoncées quelques années avant que fût réalisée la pompe à vapeur de Savery, dont nous reparlerons plus loin.

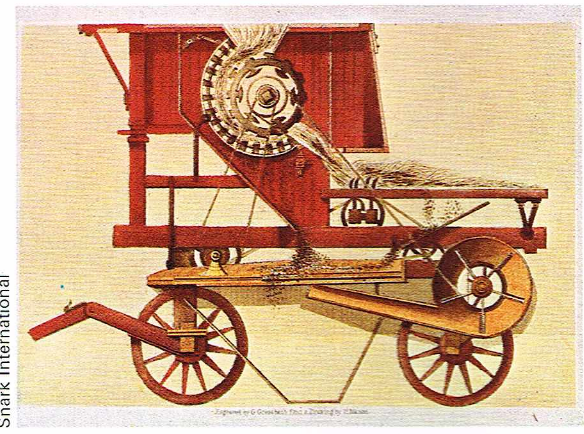
On peut se poser la question de savoir pourquoi les possibilités de l'énergie thermique ont été si mal employées pendant si longtemps. Une des raisons essentielles est sans doute liée au fait que l'étude scientifique de la chaleur fut longue et difficile. Les méthodes de mesure de la température qui sont indispensables à la conduite des sources de chaleur ne sont connues que depuis deux siècles. Plusieurs physiciens se sont pourtant intéressés à ce problème : Galilée réalisa au début du XVIIe siècle un instrument, baptisé thermoscope, permettant de mesurer des différences de température. Cet appareil, fondé sur les variations du niveau d'un liquide contenu dans un tube en fonction de la dilatation du gaz contenu dans une ampoule solidaire du tube, fut sans doute le point de départ des travaux de Rey, qui aboutirent à l'invention du premier thermomètre. Il ne restait plus qu'à définir une échelle de températures à partir d'un point haut et d'un point bas, ce qui fut l'œuvre de Fahrenheit, perfectionnée vers 1742 par le Suédois Celsius.

L'équivalence entre la chaleur et le travail mécanique fut établie de façon définitive par le physicien écossais Joule seulement en 1848, alors que la correspondance entre le mouvement et la chaleur avait déjà été perçue bien avant par certains savants qui s'opposaient ainsi aux caloristes, dont la théorie reposait sur la croyance que la chaleur était un fluide invisible qui traversait les corps lorsqu'ils étaient chauffés et disparaissait lorsqu'ils se refroidissaient. Dès 1620, sir Francis Bacon avait écrit : « L'origine de la chaleur, c'est le mouvement et rien d'autre. » Les physiciens Boyle et Hooke étaient du même avis. Mais pour que ces conceptions prennent l'avantage sur les théories caloristes, il a fallu attendre les expériences de Benjamin Thompson, comte de Rumford, qui montra « à l'émerveillement de tous » que la chaleur libérée lors du forage d'un canon en cuivre permettait de faire bouillir de l'eau sans feu. Les réflexions que lui inspirèrent ces observations expérimentales le conduisirent à repousser l'idée de l'existence du fluide calorique. Ce sont finalement les travaux de Mayer et ceux de Joule qui, en mettant clairement en évidence l'équivalence des diverses formes d'énergie, et tout particulièrement des énergies thermique et mécanique, ont conduit à la définition moderne de l'énergie.

Comme nous l'avons vu plus haut, c'est seulement à la fin du XVIIe siècle que la conversion de la chaleur en travail mécanique fut réalisée de façon pratique. En 1698, l'ingénieur militaire Thomas Savery mit au point la première pompe à vapeur viable, qui était destinée au pompage de l'eau au fond des puits de mine, et que l'on appela pour cela *l'Ami du mineur*. Elle fut perfectionnée vers 1712 par l'Anglais Thomas Newcomen. Quelques années auparavant, le Français Denis Papin s'était passionné pour l'étude des possibilités de la vapeur et avait inventé la marmite à pression ainsi que la première soupape de sûreté connue. En 1690, en combinant l'utilisation du vide par condensation avec le mécanisme piston-cylindre, il inventa la première véritable machine thermique. La machine de Newcomen, dont les utilisations étaient les mêmes que celle de Savery, présentait sur celle de Papin l'avantage de pouvoir fournir un travail effectif et de répondre à un besoin pressant qui était celui de pomper l'eau dans les puits de mine de plus en plus profonds. Les machines à feu de Newcomen se répandirent très vite, puisqu'on en comptait une centaine en Angleterre vers 1769.

L'inconvénient majeur des pompes à vapeur de Newcomen était d'exiger pour fonctionner des quantités énormes de charbon. Il fallait en effet alternativement chauffer puis refroidir le cylindre pour assurer la condensation de la vapeur. Sans l'ingéniosité de James Watt, alors mécanicien de laboratoire à l'université de Glasgow, il est probable que le rendement excessivement faible de ces premières machines à vapeur aurait eu pour





Snark International

▶ **Savery, Papin, Newcomen, Watt,** *ces noms ont présidé à la naissance et à l'expansion de la machine à vapeur, véritable révolution du XIXe siècle.*

Snark International

conséquence de freiner considérablement le développement de l'utilisation de l'énergie thermique en tant qu'énergie industrielle. En 1765, Watt inventa le condenseur et réalisa sa propre machine qui fut le point de départ de l'expansion prodigieuse de la machine à vapeur.

▲ ***Première apparition de l'éclairage de ville au gaz à Pall Mall (1809), vue par un journal anglais de l'époque (British Museum).***

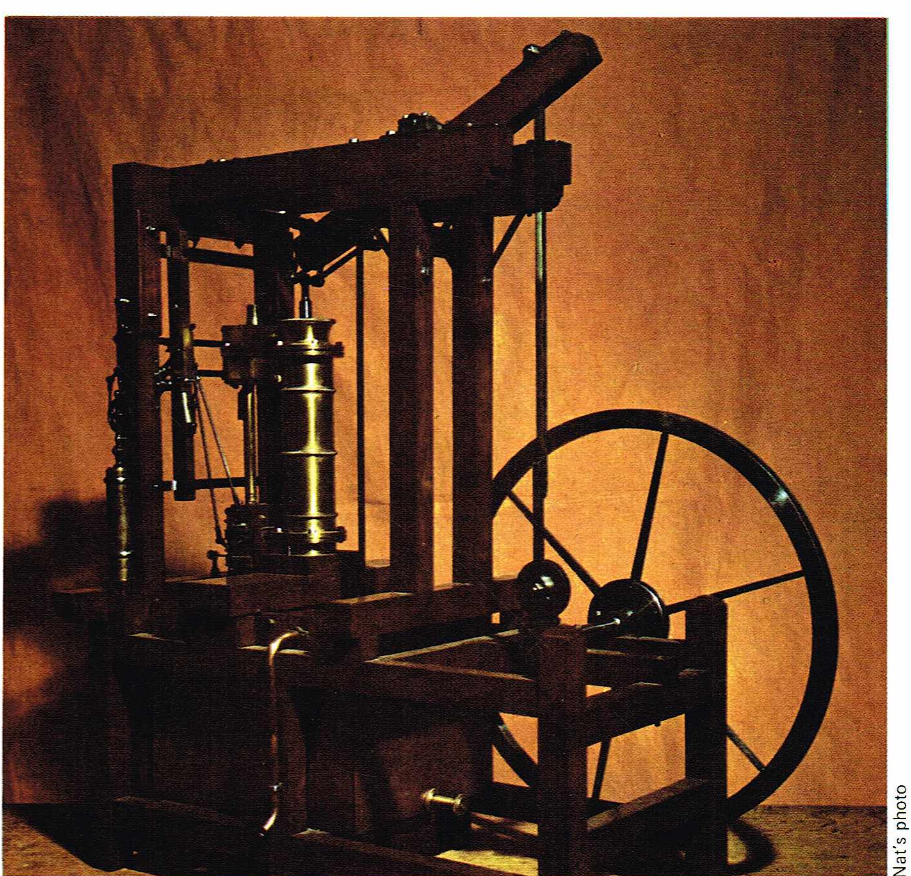
Du bois au pétrole

Au cours des siècles, les combustibles employés pour l'alimentation du feu n'ont pas été constamment les mêmes. Il est probable que le premier feu aperçu par l'homme était le brasier allumé par la foudre au cœur de la forêt ou bien le résultat de l'étincelle produite par le choc de deux silex sur un petit tas de paille sèche. Les combustibles végétaux, et tout particulièrement le bois, ont eu pendant très longtemps un rôle prépondérant. Le bois, tout en servant de matériau de construction, a été jusqu'au XVIII[e] siècle l'élément combustible essentiel aussi bien pour les usages domestiques que pour les nécessités industrielles. Actuellement, la part du bois dans l'énergie totale consommée est très faible : le charbon de terre d'abord, puis le gaz naturel et le pétrole l'ont remplacé pour presque toutes les utilisations.

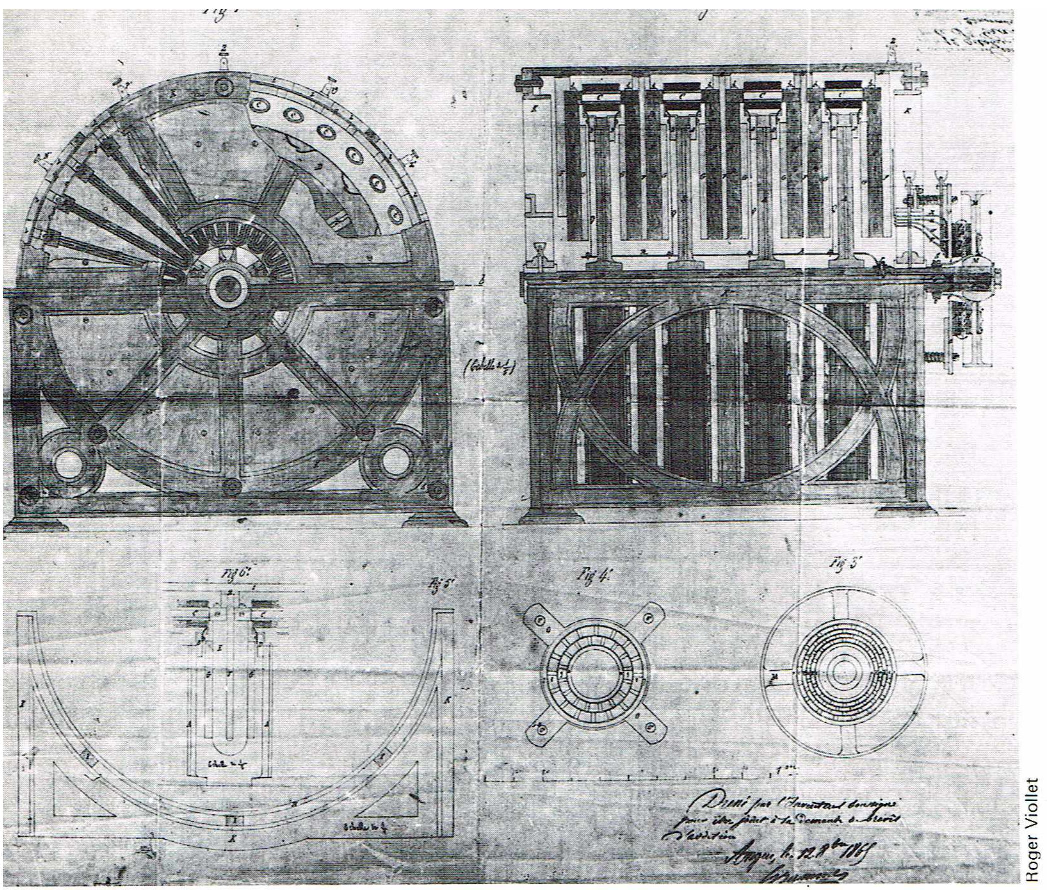
Le charbon de terre est déjà connu au Moyen Age, mais ce sont les combustibles d'origine végétale ainsi que le charbon de bois qui sont couramment employés pour les applications industrielles de l'époque, c'est-à-dire principalement le traitement des minerais et la métallurgie en général. Les premières utilisations de la houille virent le jour en Angleterre où le charbon était particulièrement accessible.

Le gaz naturel et le pétrole sont connus depuis les temps les plus anciens : la Bible rapporte que Noé se servit de bitume pour calfater l'arche, et la suprématie maritime des Phéniciens a probablement été due en partie à l'emploi de ce même bitume. On trouve dans un ouvrage traitant des réalisations de la civilisation égyptienne la description d'une lampe dont la flamme alimentée par du pétrole naturel brûlait sans fin. A la même époque, les Chinois utilisaient la combustion du gaz naturel pour extraire le sel de la saumure. Pourtant, en dehors de quelques applications très particulières, le gaz naturel et le pétrole furent essentiellement employés à des fins thaumaturgiques. On se contentait alors des

▼ ***Machine à vapeur à balancier, construite vers 1785 sous brevet de* Watt.**



Nat's photo



Roger Viollet

suintements et dégagements naturels. C'est seulement au milieu du XIXe siècle, quand on eut redécouvert les méthodes de distillation permettant d'obtenir du pétrole lampant, ce qui eut pour effet d'accroître considérablement la demande, que l'intérêt pour le potentiel commercial que pouvait représenter le pétrole commença à s'éveiller et que la recherche et l'exploitation du pétrole sous-terrain commencèrent à se répandre. Aux États-Unis, jusqu'en 1885, on exploitait seulement les faibles quantités qui suintaient directement du sol aux environs d'Oil Creek pour les vendre en vue d'applications médicales. Edwin L. Drake, chef de train en retraite, fut chargé par la Seneca Oil Company de lancer les premières recherches de pétrole par forage. Aidé d'un assistant, il construisit le premier derrick près de Titusville en Pennsylvanie. Ce puits produisit 40 litres de pétrole par jour à partir du 27 août 1859. Dès le lendemain, on assista à un phénomène identique à celui qu'avait déclenché dix ans auparavant la découverte de gisements aurifères : la ruée vers l'or noir.

En fait, l'extraction du pétrole brut ne démarra réellement qu'au tout début du XXe siècle au moment où la croissance de la production charbonnière, qui avait été très rapide entre 1850 et 1900 (décuplement en cinquante ans), commençait à se ralentir. La progression de la production mondiale en pétrole fut encore plus rapide, puisqu'elle décupla en quarante ans. Le charbon reprit une place importante dans la production mondiale de produits énergétiques avec le développement des industries soviétique et chinoise.

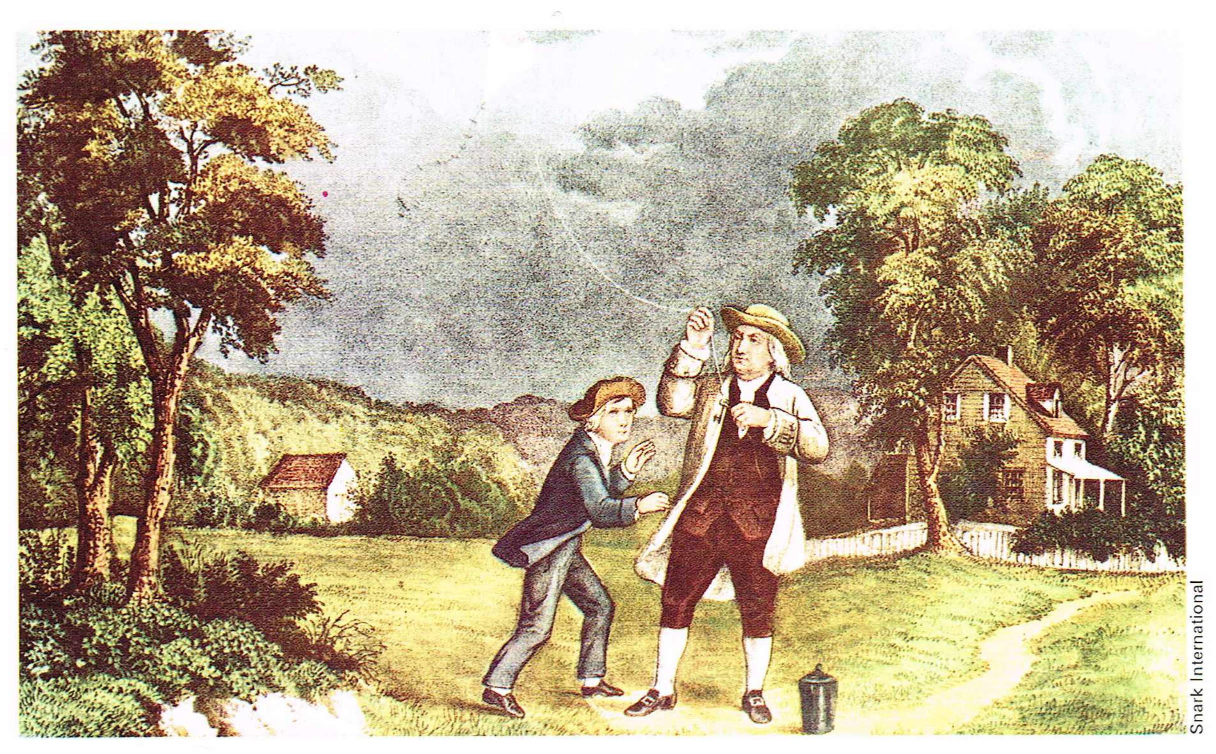
Naissance et développement de l'électricité

Alors que la capacité de l'énergie hydraulique, éolienne ou calorifique de fournir un travail mécanique fut perçue assez tôt, même si les applications pratiques mirent longtemps à se développer, l'électricité, dont certaines manifestations furent observées dès l'Antiquité, resta pendant plusieurs siècles essentiellement une curiosité scientifique. Les propriétés électrostatiques de l'ambre étaient connues des Égyptiens, et c'est probablement là que l'on doit chercher les origines des connaissances du Grec Thalès à ce sujet. Le Moyen Age étudia, lui aussi, l'aptitude de l'ambre frotté à attirer les corps légers, ainsi que certaines des propriétés de l'aimant. Il a néanmoins fallu attendre le XVIe siècle pour que les phénomènes électriques soient l'objet d'expériences scientifiques, en particulier de la part de William Gilbert, médecin de la reine Élisabeth Ire d'Angleterre. Vers 1650, Otto de Guericke construisit la première machine électrostatique constituée d'un globe de soufre monté sur un axe en bois actionné par une manivelle. Un frottoir en drap était appliqué contre le globe. Otto von Guericke avait ainsi réalisé le premier générateur d'électricité statique.

En 1785 et 1786, le physicien français Charles Coulomb établit les lois qui régissent l'interaction de deux ou plusieurs charges. Benjamin Franklin neutralisa les effets dangereux de la foudre, seule source d'électricité puissante à cette époque, en inventant le paratonnerre, mais il ne réussit malheureusement pas à la domestiquer. En fait, jusque dans les premières années du XIXe siècle, l'électricité demeura essentiellement une curiosité de laboratoire permettant de réaliser des expériences spectaculaires. La puissance des premières machines statiques ne pouvait conduire à cette époque à la moindre tentative d'application industrielle, en dépit des perfectionnements qui furent apportés à la première machine de Guericke par divers physiciens, dont Ramsden.

Après avoir été le premier à observer les effets du courant électrique sur une grenouille fraîchement disséquée, le professeur italien d'anatomie Luigi Galvani réalisa des expériences sur l'électricité qui le conduisirent à des conclusions erronées mais qui servirent de point de départ à un autre professeur italien, Alessandro Volta, pour démontrer que l'action de l'humidité sur deux métaux différents produisait un courant électrique. Il venait ainsi d'inventer la pile électrique. Bien que cela n'apparût pas de façon évidente aux yeux des contemporains, la pile de Volta convertissait l'énergie chimique en énergie électrique. Cette découverte déclencha toute une série d'études sur l'électricité qui permirent l'établissement des lois qui gouvernent le comportement

Snark International



Snark International

◀ *Expérience de* **Franklin** *en 1752, à partir de laquelle il inventa le paratonnerre.*

du courant électrique, les propriétés du magnétisme, l'action réciproque du courant et des aimants, etc. Parallèlement, de nombreux chercheurs tentaient de mettre au point des générateurs d'électricité plus puissants que la pile de Volta soit en perfectionnant celle-ci, soit en utilisant les lois de l'électromagnétisme qui avait été étudiées par Œrsted en 1820 à l'université de Copenhague. C'est ainsi que Michael Faraday réussit à fabriquer une machine produisant de l'électricité à partir du champ magnétique d'un aimant. Ce premier appareil fut perfectionné par le constructeur français Hippolyte Pixii qui conçut la première génératrice électrique réellement utilisable. Les recherches qui tendaient à suivre la voie ouverte par Volta aboutirent à la réalisation des accumulateurs qui offrent l'avantage d'être susceptibles d'emmagasiner l'énergie en période d'excédent pour la restituer en période de pénurie : ce fut pour une grande part l'œuvre de Gaston Planté.

Le premier moteur à usage industriel fut conçu, en 1837, par un forgeron américain, Thomas Davenport, pour actionner ses machines-outils ; mais c'est l'ouvrier belge Zénobe-Théophile Gramme, qui, inventant et fabriquant la première dynamo (du grec *dunamis :* énergie), ouvrit réellement la voie à l'expansion de l'utilisation de l'énergie électrique. La dynamo Gramme est une machine réversible : elle fournit de l'électricité à partir d'un travail mécanique, mais inversement elle peut, si on lui assure une alimentation en courant électrique convenable, produire un travail mécanique. Cette propriété importante n'a d'ailleurs été mise en évidence qu'à l'occasion d'un incident lors de l'exposition de Vienne en 1873. L'invention de l'alternateur, dernière étape vers les générateurs électriques modernes, est encore l'œuvre de Gramme en 1877.

L'apparition de l'électricité marque un tournant important dans l'histoire des rapports de l'homme avec l'énergie. Contrairement aux autres formes d'énergie qui avaient été exploitées jusqu'alors, l'électricité peut être transportée sur de longues distances (l'invention du transformateur statique qui permet d'assurer ce transport dans des conditions acceptables sur le plan du rendement est le fruit des travaux de Marcel Depres et date de 1881) et elle permet de distribuer l'énergie en fonction des besoins à tous les utilisateurs possibles soit pour les usages domestiques, soit pour les travaux industriels : produite elle-même à partir d'un travail mécanique ou bien d'une réaction chimique, elle peut fournir de la chaleur par effet Joule, entraîner un moteur, permettre l'électrolyse d'un corps, etc. L'énergie électrique va donc connaître un développement extraordinairement rapide durant les trente dernières années du XIXᵉ siècle.

Seules, à cette époque, la machine à vapeur et la machine hydraulique étaient susceptibles de produire une quantité d'énergie mécanique suffisante pour produire de l'électricité de telle sorte que l'on pût répondre à la demande. Plus tard viendront s'ajouter le réacteur nucléaire, l'énergie solaire et la force des marées.

L'utilisation de la force du courant des rivières est très ancienne, comme en témoignent les vieux moulins en ruine que l'on trouve au bord des rivières. L'inconvénient de ces machines, nous l'avons vu, était de n'avoir qu'une très faible puissance, puisqu'une très faible partie seulement de l'énergie des cours d'eau était prélevée, et d'imposer l'implantation des industries utilisatrices à quelques mètres seulement de la rive.

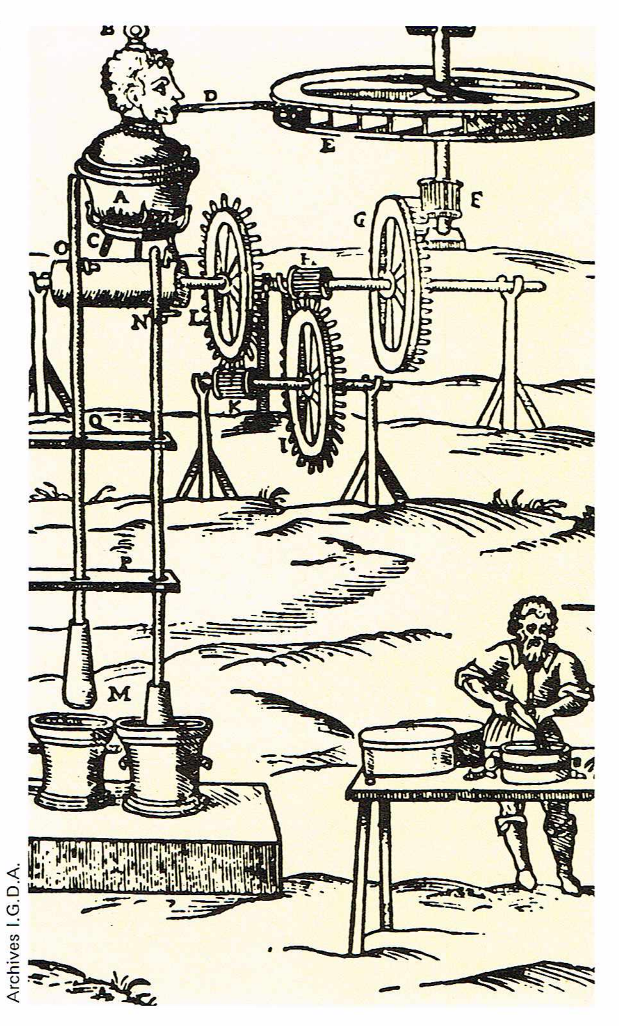
En 1830, l'ingénieur Benoît Fourneyron remporta le premier prix d'un concours organisé par la Société d'encouragement pour l'industrie nationale pour améliorer la roue hydraulique en présentant la première turbine à eau. Il perfectionna son invention constamment, mais l'intérêt qu'elle présentait comme moteur fut éclipsé par la machine à vapeur jusqu'en 1880, date à laquelle la demande d'électricité devint très forte à la suite des résultats spectaculaires obtenus par Thomas Edison qui avait mis au point la lampe à incandescence mais, surtout, qui avait résolu bon nombre de problèmes posés par la distribution et le contrôle d'utilisation de l'électricité en créant la centrale de Pearl Street dans un quartier du bas Manhattan. Cette centrale, équipée de dynamos d'une puissance de 100 kW qui fonctionnaient grâce à des machines à vapeur à piston, fut inaugurée le 4 septembre 1882. Ce jour-là, cinq mille lampes s'allumèrent dans les magasins et les maisons des environs.

En 1868, un papetier nommé Berges réussit à aménager une chute d'eau de 200 mètres, apportant ainsi une solution au problème que posait la faible puissance que l'on tirait jusque-là des cours d'eau. Le premier turbogénérateur fut mis en service sur les chutes du Niagara en 1895. Sa puissance était d'environ 5 000 ch. L'hydroélectricité, qui emploie la « houille blanche », ne cessa de se développer depuis mais ne remplaça pas l'électricité d'origine thermique. La construction d'une centrale hydro-électrique nécessite un investissement très important au départ pour la réalisation d'ouvrages d'art volumineux et coûteux. Par contre, les frais d'exploitation sont généralement modiques.

Parallèlement aux travaux qui amenèrent à la réalisation de la turbine hydraulique, des recherches étaient entreprises pour améliorer la machine thermique à piston de James Watt. En 1880, un ingénieur suédois, Carl-Patrick de Laval, avait réalisé une machine que l'on peut considérer comme une turbine à vapeur utilisable industriellement.

◀ *Page ci-contre, en haut, dessin envoyé par* **Gramme** *à l'appui d'une demande de brevet d'invention de la machine magnéto-électrique (Angers, 1865). En bas, la distribution et le contrôle d'utilisation de l'électricité mis au point par* **Thomas Edison** *; l'énergie électrique pénètre alors la vie quotidienne des utilisateurs. Ici, une rue de Broadway vers 1893.*

▶ ***Dessin original de la machine à vapeur de l'architecte italien* G. Branca.**



Archives I.G.D.A.

Le principe adopté est identique à celui que proposait en 1629 l'architecte italien Giovanni Branca : une chaudière de bronze envoie la vapeur sur une roue à aubes qui actionne deux pilons par l'intermédiaire d'un système d'engrenages. Entre 1880 et 1900, Laval perfectionna sa machine mais l'Anglais Parsons mit au point la turbine à réaction qui s'avéra être un appareil beaucoup plus puissant. Vers 1900, vint s'ajouter la turbine mise au point par l'ingénieur Rateau.

Si le XIXe siècle fut essentiellement le siècle de la vapeur, on peut considérer que le XXe fut celui de l'électricité qui modifia considérablement le mode de vie et les habitudes. Elle donna à chacun la possibilité d'utiliser pour une multitude d'usages une énergie qui lui permettait d'économiser ses muscles.

L'âge de l'atome

En 1905, un jeune employé du service des brevets d'invention de Zurich tout frais émoulu de l'Institut polytechnique, Albert Einstein, publia une série d'articles scientifiques dont l'un, *De l'électrodynamique des corps en mouvement*, contenait les éléments essentiels de la théorie de la Relativité dont les conséquences sur l'histoire de la science mais aussi sur celle de l'énergie furent capitales. Nous n'allons pas traiter ici de la Relativité dans son ensemble, mais nous allons étudier ses implications dans le domaine de l'énergie.

Les physiciens de l'époque admettaient deux principes fondamentaux : la conservation de l'énergie et la conservation de la masse. Toute variation de masse était considérée comme la conséquence d'une action d'origine mécanique ou chimique. Or Einstein affirmait que la vitesse d'un corps a une influence sur sa masse et que, pour des vitesses très élevées proches de la vitesse maximale possible, c'est-à-dire la vitesse de la lumière, la masse augmentait considérablement en tendant vers une valeur infinie. A partir de ces conclusions, Einstein sauta un pas particulièrement important en affirmant que la masse est l'équivalent de l'énergie, ce qui implique que l'augmentation ou la diminution de l'énergie sont toujours associées à une variation de masse généralement imperceptible, tout au moins par les moyens d'observations existant à l'époque. Par exemple, lorsque de l'énergie sous forme de chaleur est transmise à un corps, sa masse doit augmenter. Il est curieux de noter que cela rejoint les opinions des caloristes du XVIIIe qui associaient une augmentation de poids à une élévation de température à cause du passage du fluide calorique à l'intérieur de la matière.

Le rapport qu'il avait ainsi établi entre masse et énergie suggéra à Einstein qu'une conversion directe masse-énergie était possible, mais les moyens à mettre en œuvre pour réaliser cette conversion ne pouvaient être même imaginés à l'époque où furent publiées ses conclusions.

Les réactions des contemporains furent, comme on peut s'en douter, très vives ; néanmoins la solidité et la rigueur des arguments présentés par Einstein arrivèrent à convaincre peu à peu les physiciens et, en 1932, la découverte du positon par C. D. Anderson lors d'une expérience sur les rayons gamma confirma la théorie de l'équivalence entre la masse et l'énergie.

L'ère de l'énergie atomique venait de commencer. Si tous les savants furent convaincus de la validité des conclusions d'Einstein, personne ne voyait quel pouvait être le procédé qui permettrait de tirer l'énergie de la matière. Pourtant les travaux de recherche sur la constitution intime de la matière avançaient très rapidement. En 1935, le prix Nobel de physique fut décerné à l'Anglais Chadwick pour la découverte du neutron et, en 1938, l'Allemand Otto Hahn, utilisant les neutrons, réalisa la première fission de l'atome d'uranium. Le but de son expérience était l'obtention d'éléments plus lourds, mais en fait la réaction produisit du baryum qui est plus léger. C'est O. E. Frisch et Lise Meitner qui expliquèrent l'année suivante les résultats des expériences de Hahn en suggérant que la fission de l'uranium donne deux noyaux de masses voisines. La masse qui manque à la fin de la réaction a été transformée en énergie.

Von Halban, Joliot et Kowarski montrèrent en 1939 que la fission de l'uranium s'accompagne de libération de neutrons rendant possible une réaction en chaîne.

L'expérience décisive eut lieu en 1942 sur le stade de l'université de Chicago où Enrico Fermi, exilé aux États-Unis (après son refus d'exécuter le salut fasciste lors de la cérémonie de remise du prix Nobel qui lui fut attribué en 1938 pour ses travaux sur les neutrons et plus spécialement les neutrons lents), démarra la première réaction en chaîne d'une véritable pile atomique. Le combustible était constitué d'uranium inséré dans un bloc de graphite qui devait ralentir les neutrons produits lors de la réaction, Fermi ayant observé que les neutrons lents étaient plus efficaces que les neutrons rapides pour casser les noyaux d'uranium. Pour que l'énergie ainsi produite ne soit pas libérée avec une trop grande brutalité, il est nécessaire de pouvoir contrôler le processus de réaction en chaîne. Cela fut réalisé en introduisant un élément, absorbant les neutrons, dans le cœur du réacteur.

Le problème de l'utilisation de l'énergie nucléaire n'était pas pour autant résolu : le combustible utilisé était un métal rarissime à l'époque réservé aux expériences des physiciens de la matière. De plus, l'uranium naturel utilisé par Fermi était faiblement radio-actif et la masse de combustible nécessaire était extrêmement élevée (7 tonnes pour le premier réacteur). On connaissait l'existence de l'uranium 235 hautement radio-actif, mais les techniques permettant de l'isoler étaient encore loin de voir le jour.

L'un des facteurs prépondérants qui ont aidé au développement des applications de l'énergie nucléaire est la coïncidence de ces découvertes avec la Seconde Guerre mondiale. En juillet 1940, Albert Einstein écrivit une longue lettre au président des États-Unis pour l'informer des possibilités offertes par la fission de l'atome. A la suite de l'expérience de Fermi qui mit en évidence la possibilité de réaliser une réaction en chaîne, des investissements considérables furent débloqués pour la réalisation du projet Manhattan qui devait aboutir à la bombe atomique.

L'une des conséquences importantes du projet Manhattan fut la mise au point de procédés de séparation des deux isotopes de l'uranium permettant d'isoler l'ura-



▲ *En 1932,* **Anderson** *confirme la théorie de la* **Relativité** *d'***Einstein** *: l'ère de l'énergie atomique venait de commencer ; la technologie du XXe siècle s'emploie à lui trouver les plus utiles applications. Ici, le navire brise-glace soviétique* **Lénine** *à propulsion atomique.*

nium 235. Mais, pour réaliser la bombe qui devait détruire Nagasaki, on utilisa un corps qui venait d'être découvert par Seaborg : le plutonium. Pour produire celui-ci, les Américains utilisèrent des piles copiées sur celle de Fermi où l'uranium naturel bombardé par les neutrons produisait ce nouveau corps plus fissile que l'uranium 235. Par la suite, le plutonium allait être l'élément combustible de la dernière génération des réacteurs, les surrégénérateurs.

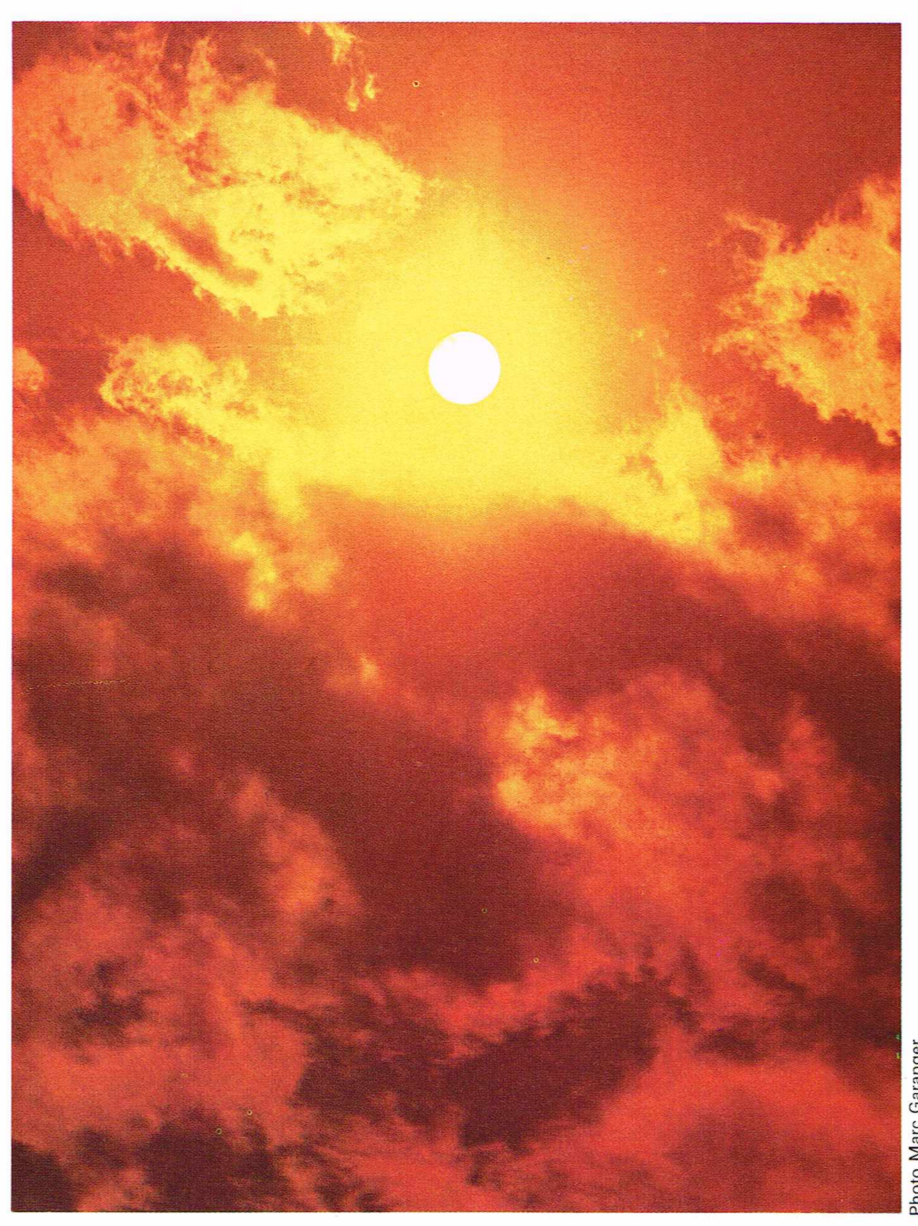
Contrairement à ce que l'on recherche dans une pile, la libération d'énergie d'une bombe doit être aussi brutale que possible. Il fallait donc trouver le moyen de concentrer brutalement la masse critique pour que se déclenchât automatiquement la réaction en chaîne et qu'elle se poursuivît ensuite sans contrôle. Ce problème fut résolu en entourant le cœur de la bombe séparé en plusieurs morceaux de charges d'explosifs conventionnels qui, au moment de l'explosion, rapprocheraient les fragments de matériau fissile.

La première bombe nucléaire explosa dans le désert d'Alamogordo le 16 juillet 1945 et, le 6 août 1945, Hiroshima était détruite.

Après la guerre, les travaux réalisés grâce au projet Manhattan servirent à la mise en route de la construction des premiers réacteurs nucléaires destinés à la production d'électricité. Plusieurs types de réacteurs ont été mis au point. Ils fonctionnent tous en général sur le même principe, mais ils se différencient par le matériau combustible qu'ils utilisent : le fluide qui prélève les calories émises par le cœur du réacteur fait fonctionner une turbine à vapeur, elle-même entraînant un générateur d'électricité, le modérateur de neutrons, etc. Selon leurs possibilités techniques, les différents pays qui ont construit les premiers réacteurs nucléaires se sont orientés vers une filière ou vers une autre. A l'heure actuelle, un certain nombre d'entre elles ont été, sinon abandonnées, du moins mises en sommeil au profit de celles qui ont permis d'obtenir de l'énergie électrique à un prix comparable à celui de l'électricité issue des centrales thermiques ou hydrauliques. La brutale augmentation des prix du pétrole et des matières premières depuis 1973 donne une accélération nouvelle au développement des centrales nucléaires de puissance bien que la part de l'énergie mondiale qu'elles fournissent soit encore relativement faible.

L'énergie nucléaire présente par rapport aux autres formes modernes d'énergie l'avantage de ne pas nécessiter d'oxygène, contrairement à ce qui se passe lors de la combustion du pétrole ou du charbon. Si l'on peut envisager pour l'avenir des réacteurs nucléaires assurant la propulsion des automobiles, il existe une application spectaculaire de cette forme d'énergie qui utilise l'avantage dont nous venons de parler et le fait que, contrairement aux centrales hydro-électriques, le réacteur nucléaire est totalement autonome : c'est le sous-marin atomique, dont le premier exemplaire fut lancé le 21 janvier 1954. Depuis, beaucoup de ces navires circulent dans les mers du globe.

On ne peut pas séparer l'énergie nucléaire due à la fission des atomes d'uranium ou de plutonium de celle qui est due à la fusion. Bien que cette source d'énergie soit encore loin d'être suffisamment maîtrisée pour donner lieu à des applications pacifiques, il y a tout lieu de penser qu'elle connaîtra un grand développement dans un avenir proche. Si la théorie de la fusion commence à être assez bien connue, les températures mises en jeu lors de sa réalisation sont à un niveau tel qu'il n'est pas possible de trouver un récipient où elle puisse se produire en toute sécurité, mais l'utilisation de techniques de confinement par un champ magnétique permet de conserver de grands espoirs quant à l'avenir de cette forme d'énergie, d'autant plus que le combustible qu'elle utilise, l'hydrogène, se trouve en quantité illimitée dans l'air, dans l'eau et dans la terre. Comme dans le passé, l'exploitation d'une forme nouvelle d'énergie se heurte à des difficultés technologiques qui empêchent de contrôler l'énergie de fusion et qui en ont donc limité les applications pratiques à la réalisation de la bombe thermonucléaire, dont le premier exemplaire a explosé en novembre 1952 sur l'atoll d'Eniwetok.


Photo Marc Garanger

▲ *Le Soleil, source d'énergie inépuisable à l'échelle de l'humanité.*

Le Soleil, la mer et d'autres

Dans ce qui précède, nous n'avons pas parlé de nombreuses autres formes d'énergie que chacun connaît pourtant : l'énergie solaire, l'énergie des marées, l'énergie du rayon laser et d'autres encore. La raison principale est que, sur le plan historique, ces diverses sources ont eu peu d'influence sur le développement de la civilisation, ou, beaucoup plus souvent, commencent à peine à être utilisées. Nous nous proposons néanmoins de voir pour un certain nombre d'entre elles les raisons qui ont empêché qu'elles ne se développent.

Dès son apparition sur la Terre, l'homme a été sensible à l'action des rayons du **Soleil,** il est même probable que l'analogie entre les effets du feu et ceux du Soleil lui apparurent rapidement. Mais, si le Soleil est une source d'énergie indispensable à la vie sur la Terre, maîtriser sa puissance est techniquement très difficile. Chacun connaît l'histoire probablement apocryphe qui décrit comment Archimède, à l'aide d'un jeu de miroirs qui captaient les feux du Soleil, incendia la flotte ennemie dans le port de Syracuse. Elle montre que les Anciens étaient conscients des possibilités offertes par l'exploitation de cette source d'énergie inépuisable. Pourtant, en dehors de son utilisation directe pour l'évaporation qui permet de recueillir le sel dans les marais salants, on ne trouve pas dans le cours de l'histoire d'applications de l'énergie solaire à des fins industrielles. La puissance émise par le Soleil nous arrive de manière diffuse et, pour la transformer en source de puissance effective, il faut la capter et la concentrer comme l'avait fait Archimède. En fait, bien que la technique apparaisse simple dans son principe, elle est complexe et onéreuse si l'on veut obtenir une quantité d'énergie suffisante pour que son exploitation puisse être sérieusement envisagée. De plus, le Soleil n'illumine la Terre que pendant le jour, et l'intensité des rayons qui atteignent la Terre dépend des conditions atmosphériques. Il a donc fallu attendre le XXe siècle pour que la technologie atteigne un niveau de développement suffisant et que cette énergie puisse être employée pour certaines applications : batteries solaires des véhicules spatiaux, four solaire permettant d'atteindre ponctuellement des températures très élevées, ou bien encore pompe fonctionnant à l'énergie solaire pour l'alimentation en eau de certains pays d'Afrique où le Soleil est abondant mais où les autres sources d'énergie sont peu nombreuses.

La **houille verte** (force motrice des marées) n'a jamais été réellement exploitée avant que ne soient réalisées après beaucoup d'études et d'hésitations, les usines marémotrices, dont la plus connue est celle de la Rance en France. Là encore, la mer est une source d'énergie puissante mais capricieuse, et la maîtrise de cette énergie nécessitait au préalable une maîtrise totale de l'énergie hydraulique dont nous avons vu qu'elle ne fut réellement acquise qu'à la fin du XIXe siècle et au début du XXe.

Ce qui différencie le XXe siècle des siècles qui l'ont précédé est que l'étude rationnelle de ces sources d'énergie et de leurs possibilités n'a pas été négligée, et il est possible que, dans l'avenir, l'exploitation de l'énergie des marées se fasse à une échelle beaucoup plus importante. Néanmoins il paraît plus réaliste de la considérer actuellement plutôt comme une énergie d'appoint.

Le **laser** dont la découverte est très récente mais dont les utilisations comme source d'énergie sont déjà très nombreuses dans les domaines les plus variés, doit surtout être considéré comme un moyen de transporter sans perte de fortes impulsions d'énergie à des distances importantes.

Enfin, pour conclure, il faut faire allusion à l'**énergie chimique,** dont nous n'avons pas parlé jusqu'à maintenant, alors que c'est la forme principale de l'énergie dont nous disposons : elle est à l'origine de l'énergie humaine et de l'énergie animale en transformant les aliments en muscles, elle est à la base de l'énergie thermique puisque la combustion du pétrole ou du charbon n'est en fait qu'une réaction chimique. Les applications directes de l'énergie chimique sont peu nombreuses, sauf en ce qui concerne l'usage de la poudre à canon inventée par les Chinois il y a fort longtemps et qui fut importée en Europe beaucoup plus tard. La poudre sert bien évidemment surtout pour les applications militaires, mais on a vu après la Seconde Guerre mondiale se développer un certain nombre de procédés de mise en forme ou d'assemblage de matériaux particuliers utilisant l'explosion d'une charge de poudre.

La pile de Volta peut être considérée comme un convertisseur d'énergie chimique en énergie électrique. De même, la pile à combustible où l'énergie de réaction d'oxygène et d'hydrogène est directement convertie en énergie électrique.

Conclusion

Dans tout ce qui précède, on a tenté en premier lieu de donner une définition satisfaisante de l'énergie, puis d'en citer les diverses formes connues actuellement, et enfin de montrer comment l'homme a peu à peu conquis l'énergie pour assurer sa domination sur l'Univers.

L'énergie qui s'exprime dans le souffle du vent ou dans le mouvement de la mer fait sentir de façon très directe son influence sur nous. De même, nous sommes sensibles à la chaleur des rayons du Soleil ou à l'action du courant électrique. L'interaction de ces sources d'énergie avec notre corps n'est pas la même et n'a pas les mêmes effets, pourtant derrière ces manifestations si dissemblables se cache une grandeur unique, l'énergie. Selon le sens que l'on donne à ce mot, l'énergie peut être considérée avant tout comme une abstraction mathématique permettant de décrire les lois constatées expérimentalement dans l'Univers ou bien comme l'origine de toutes les forces dont nous observons les effets.

La notion d'énergie permet de comprendre pourquoi la chaleur et le travail mécanique sont transformables

l'un dans l'autre, mais ce que nous voyons, ce ne sont pas les effets de l'énergie thermique ou de l'énergie mécanique, mais ceux de la chaleur et des forces. La confusion entre le concept physique d'énergie et la nature des sources qui permettent de produire une des formes de cette énergie unique est encore fréquente.

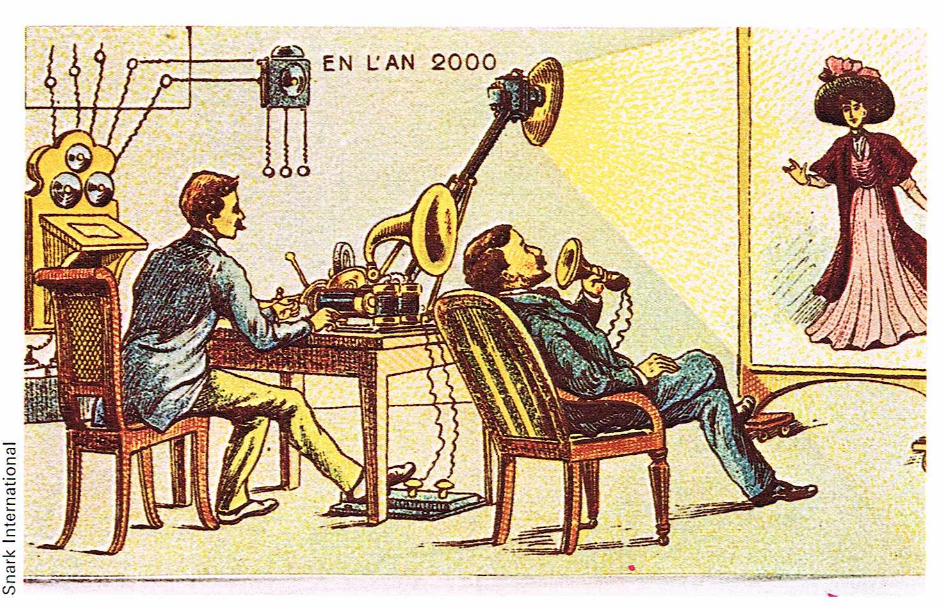
Le vent, le Soleil, le courant des rivières, la marée, le charbon, le pétrole, l'atome, autant de sources que nous connaissons et dont nous savons tirer cette énergie dont nous avons besoin pour survivre. Ces sources sont nombreuses, certaines sont presque inépuisables comme le vent ou le Soleil, d'autres au contraire ne pourront pourvoir indéfiniment à nos besoins. De plus, toutes n'ont pas la même rentabilité, et la disparition d'une source importante ou même simplement son appauvrissement, alors que la demande en énergie ne fait que croître, risque de nous plonger dans une situation dramatique. C'est pourquoi il est important que le XXe siècle n'ait pas rejeté dans l'ombre des techniques de production d'énergie difficiles (énergie solaire par exemple ou fusion nucléaire) ou désuètes (énergie éolienne).

Y a-t-il des formes d'énergie que nous ne connaissons pas? Si cette question avait été posée il y a par exemple 200 ans, quelle aurait été la réponse? Même à une époque plus récente, après que l'équivalence entre les diverses formes d'énergie a été établie, il n'est pas certain que la réponse soit affirmative, et pourtant l'énergie nucléaire a manifesté en peu de temps sa puissance et a pris une importance considérable parmi les sources d'énergie exploitables pour produire de l'électricité. Nous ne reconnaissons la présence de l'énergie qu'à ses effets, aussi pouvons-nous nous poser la question différemment : observons-nous des phénomènes qui pourraient être une manifestation d'une source d'énergie inconnue? Oui, certainement. Nous constatons parfois des phénomènes qui ne correspondent pas à ce que nous attendions, mais la plupart du temps l'explication se trouve dans ce que nous connaissons.

On peut faire allusion, bien qu'il ne s'agisse pas là, tout au moins actuellement, de domaines qui soient couramment l'objet d'études scientifiques, aux manifestations de pouvoirs paranormaux qui sont généralement le fait d'individus qu'aucune caractéristique particulière ne désigne à l'attention mais qui sont capables d'avoir sur les objets une influence directe sans les toucher; en d'autres termes de transmettre de l'énergie mécanique à distance. Bien entendu, il faut être extrêmement prudent devant ces expériences destinées à mettre en évidence cette forme particulière de l'énergie humaine, mais il ne faut pas rejeter sans examen, en se contentant de nier leur existence, les observations faites à ce sujet. Un certain nombre d'éléments pourraient être vérifiés sans que cela pose de difficultés particulières : par exemple, les éprouvettes métalliques tordues par Uri Geller sans qu'il y ait eu contact pourraient être examinées pour déterminer si l'on a affaire à un mode particulier ou non de déformation.

Il y a quelques années, l'hypothèse que le cosmos était une source inépuisable d'énergie avait été avancée par un Français qui proposait des expériences qui devaient selon lui mettre en évidence la possibilité de recueillir sur notre planète les effets de cette source d'énergie immense. Très récemment, un groupe de physiciens a pu réaliser les expériences proposées, malheureusement elles n'ont pas donné les résultats attendus et l'énergie du cosmos, si elle existe, restera encore longtemps inaccessible.

Pour revenir à des considérations peut-être un peu plus scientifiques, il n'est pas possible d'affirmer que nous connaissons actuellement toutes les sources d'énergie, cela serait extrêmement présomptueux et témoignerait d'un manque d'optimisme certain quant au futur de l'être humain, néanmoins nous pouvons dire que la notion d'énergie en tant que grandeur physique et sa relation avec les phénomènes observables sur la Terre depuis que l'homme est en mesure de les constater sont devenues depuis quelques années claires et précises. Nous savons comment on peut caractériser une forme nouvelle d'énergie : elle doit être convertible en une autre forme d'énergie. Si une source inconnue d'énergie venait à se révéler, nous la reconnaîtrions, ce qui n'implique pas que nous serions en mesure de l'exploiter et de la plier à nos exigences.



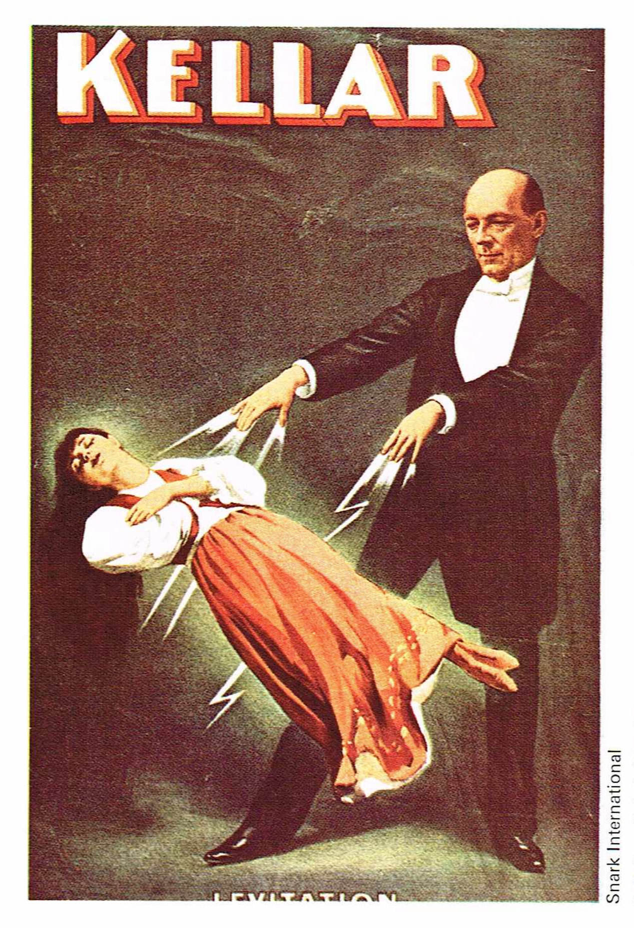
Snark International

▲ *Quand la réalité dépasse la fiction... L'audio-visuel en l'an 2000, gravure d'anticipation de la fin du XIXe siècle.*



Snark International

◀ *Utilisé au VIIe siècle par les Byzantins qui en gardaient jalousement le secret, le feu grégeois était une composition incendiaire à base de salpêtre et de matières bitumineuses qui brûlait même au contact de l'eau (manuscrit byzantin, Bibliothèque nationale, Madrid).*



Snark International

◀ *La manifestation de phénomènes paranormaux mettant en évidence une forme particulière de l'énergie humaine a toujours intrigué : ici, une affiche du XIXe siècle illustrant « improprement » le phénomène dit de lévitation qu'il faudrait nommer ici télékinésie.*

ÉVALUATION DES RESSOURCES ÉNERGÉTIQUES DE LA PLANÈTE

L'énergie dont nous pouvons disposer a quatre origines :

— le rayonnement solaire ;

— la chaleur souterraine qui provient essentiellement de la radio-activité naturelle des roches ;

— les forces d'inertie qui résultent des phénomènes gravitationnels du système solaire ;

— les réactions nucléaires de fission ou de fusion.

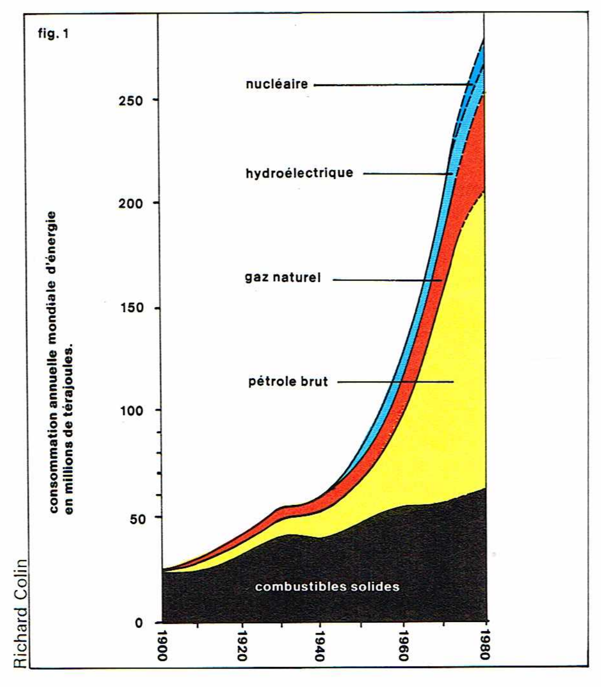
On peut donc dire, d'une façon générale, que nos ressources énergétiques sont constituées par des réserves naturelles d'énergie dont l'origine appartient à l'une des catégories ci-dessus.

— L'énergie solaire est produite à chaque instant au cœur du Soleil par des réactions de fusion nucléaire et rayonnée dans l'espace sous la forme d'ondes électromagnétiques. C'est ce rayonnement capté par la Terre qui a permis l'évolution biochimique de notre planète. Les déchets organiques, végétaux ou animaux, dont la fossilisation a permis la constitution des réserves de charbon et de pétrole que nous connaissons aujourd'hui, n'auraient pas pu être produits sans le rayonnement solaire. Il faut donc ranger toutes nos énergies fossiles sous la rubrique « solaire ». Pour marquer cette différence entre l'énergie reçue aujourd'hui en provenance du Soleil et l'énergie solaire de jadis, « mise en conserve » dans le charbon ou le pétrole, nous diviserons l'étude des ressources d'énergie solaire en deux parties : les ressources non fossiles et les ressources fossiles.

— L'énergie en provenance de la chaleur souterraine est appelée « énergie géothermique ». L'extraction de cette énergie peut être « naturelle » ou « artificielle » suivant le degré de complexité des technologies mises en œuvre.

— Les forces d'inertie dues à la gravité sont des forces de nature mécanique. Cette énergie est difficile à capter. La possibilité la plus notable et la plus connue consiste dans l'utilisation des marées, dans les usines marémotrices.

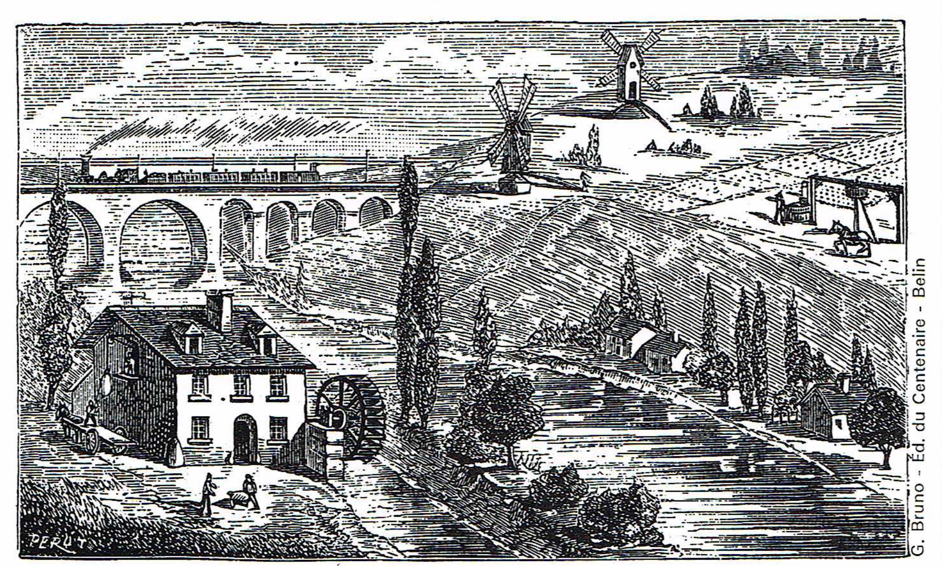
— On examinera enfin les ressources permettant la mise en œuvre de l'énergie d'origine nucléaire, soit par l'utilisation de réactions de fission ou de fusion.



▶ *Figure 1 : représentation graphique de la modification d'utilisation des ressources énergétiques au XXe siècle.*

Pendant des millénaires, les hommes ont vécu sur l'énergie solaire : ils n'avaient en effet à leur disposition que leurs propres forces musculaires, celles des animaux de trait, le vent et les eaux courantes, pour satisfaire les besoins mécaniques, le bois étant pratiquement la seule source d'énergie thermique. Il en est encore ainsi aujourd'hui dans de nombreux pays en voie de développement : En Asie par exemple, plus d'un milliard d'hommes ne connaissent guère que les animaux pour tirer les outils agricoles, puiser l'eau ou moudre le grain. Dans le monde entier, près de la moitié de la population dépend de ressources énergétiques d'origine végétale : bois, déchets agricoles, etc.

▼ ***Extrait du* Tour de la France par deux enfants *(1877, édition du centenaire, Belin, 1977), une illustration qui récapitule les principales forces motrices que l'homme utilise : l'animal, l'eau, le vent, l'électricité et enfin « la grande force de la vapeur qui fait mouvoir tant de machines et de locomotives ».***



Cette situation s'est modifiée au XVIIIe siècle avec l'utilisation progressive du charbon à la fois comme source d'énergie thermique et source d'énergie mécanique par l'intermédiaire de la machine à vapeur. Cette mutation commença d'abord en Grande-Bretagne pour toucher ensuite la France, l'Allemagne et les États-Unis. La production de charbon augmenta rapidement au cours du XIXe siècle (20 millions de tonnes en 1800, 100 millions de tonnes en 1850, et 500 millions de tonnes en 1890). Au début du XXe siècle, la venue de nouveaux producteurs, ajoutée à l'activité croissante des puissances charbonnières, permet à l'économie mondiale de franchir une production d'un milliard de tonnes. En 1960, le charbon occupe, et de loin, la première place comme source d'énergie (charbon 95 %, pétrole 4 %, hydraulique 1 %).

En 1977, nous dépendons toujours beaucoup des combustibles fossiles mais des glissements importants se sont produits, comme suite à une augmentation rapide de l'utilisation du pétrole brut et du gaz. Le nucléaire commence à apparaître, mais les effets des programmes en cours dans de nombreux pays du monde ne se feront pas sentir avant une dizaine d'années. Il faut donc retenir qu'à l'échelle mondiale nous dépendons en matière d'énergie, pour longtemps encore, des combustibles fossiles. Ces ressources n'étant pas renouvelables, et même si des divergences sur l'importance des réserves existent, tous les experts sont en accord pour prédire l'épuisement des gisements au cours du XXIe siècle. Le pétrole et le gaz s'épuiseront les premiers (on annonce la fin prochaine du gisement de Lacq en France). Le charbon résistera davantage, étant donné ses ressources considérables, mais il n'est pas certain que de difficiles problèmes de rentabilité ne viennent limiter les perspectives de cette forme d'énergie.

Face à cette échéance inéluctable, deux voies conduisant vers des sources d'énergie inépuisables nous sont proposées aujourd'hui : la voie du nucléaire qui passe par l'étape actuelle des réacteurs à fission, puis demain par celle des surrégénérateurs, pour aboutir enfin à la fusion qui éclipsera alors les autres modes de production utilisant l'énergie nucléaire ; l'autre voie est celle qui conduit à l'utilisation massive de l'énergie solaire sous toutes ses formes, revenant ainsi, par un juste retour des choses, selon les écologistes, à la situation initiale de l'humanité qui tirait toutes ses ressources énergétiques du Soleil.

Roland Michaud - Rapho

▲ ***Plus d'un milliard d'hommes ne connaissent encore que les animaux pour tirer les outils agricoles, puiser l'eau ou moudre le grain... Ici, un attelage en Anatolie (Turquie orientale).***

Sans vouloir prédire l'avenir, on peut avancer que dans le monde de demain les différentes formes d'énergie (*fig.* 1) seront plus complémentaires que concurrentes. L'époque où de simples critères économiques permettaient à la forme d'énergie la moins chère de supplanter toutes les autres semble révolue. De nouveaux facteurs, et en particulier celui de l'indépendance énergétique recherchée aujourd'hui par tous les pays, conduisent à la diversification. Nous ne sommes plus dans une situation où chaque forme d'énergie prenait place dans une file d'attente en attendant son heure. La crise actuelle a bouleversé cette situation et redonné toutes leurs chances aux différentes formes d'énergie. Énergies d'aujourd'hui qui s'épuisent, énergies oubliées qui reviennent au premier plan, énergies de demain qui restent à maîtriser, nul ne doute à présent que nous aurons à coexister avec elles toutes, pour le plus grand profit de l'humanité.

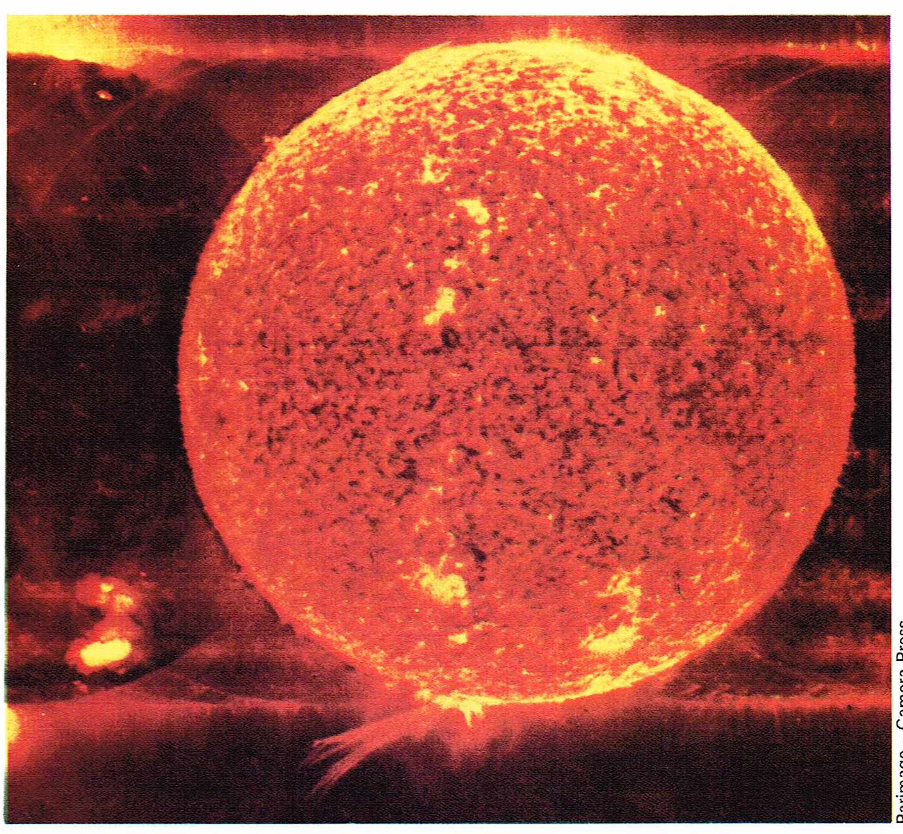
Ressources d'origine solaire, non fossiles

Le Soleil est le siège de réactions thermonucléaires de fusion. Au cours de ces réactions, l'hydrogène se transforme en hélium, avec un intense dégagement de chaleur. Au cœur de l'astre, la température dépasse 100 millions de degrés centigrades, la température superficielle n'étant que de 6 000 °C environ.

Le Soleil rayonne une quantité considérable d'énergie dont une partie atteint notre planète. Le flux énergétique dans l'espace planétaire, à une distance de l'ordre de celle de la Terre au Soleil, est de 0,14 W/cm². La quantité d'énergie captée par la surface apparente de la Terre est considérable : 170 000 milliards de kW/h. On s'en rendra mieux compte en notant que l'énergie reçue dans une journée représente plus de 10 000 fois la totalité de l'énergie consommée sur la Terre pendant le même laps de temps. On pourrait dire aussi que la quantité d'énergie que le Soleil nous envoie chaque année est plus de cinq fois supérieure à l'énergie contenue dans la totalité de nos réserves en combustibles fossiles et en combustibles nucléaires fissiles.

Il faut constater aussi le peu d'usage que nous faisons de cette énergie solaire en dehors de celui qui résulte de ses actions naturelles : le cycle des pluies (usines hydro-électriques), le vent (navigation et éoliennes), la photosynthèse (forêts, agriculture) et l'échauffement

▼ ***Le Soleil est le siège de réactions thermonucléaires de fusion au cours desquelles il se produit un intense dégagement de chaleur : au cœur de l'astre, la température dépasse 100 millions de degrés centigrades.***



Parimage - Camera Press

(marais salants). En fait, l'homme s'est simplement contenté jusqu'à aujourd'hui de tirer parti des phénomènes naturels (pluies et vents) et d'utiliser ces capteurs élaborés d'énergie solaire que sont les végétaux. Ceci explique pourquoi, chez les peuples anciens, le Soleil, reconnu comme source de toute vie, était adoré lui-même comme dispensateur de chaleur et de lumière, quand il n'était pas personnifié pour faire l'objet d'un culte. Ce faisant, on n'utilise qu'une fraction très faible de l'énergie fournie par le Soleil (de l'ordre de quelques %).

On pourra s'étonner aujourd'hui de cette situation, d'autant plus que les qualités de cette forme d'énergie la rendent particulièrement attrayante. Elle est en effet :
— inépuisable, à l'échelle de l'humanité ;
— gratuite, à la production et à la distribution ;
— non polluante, car sans bruit, ni déchets ;
— universelle, car distribuée partout.

Pourtant l'énergie solaire n'est pas en mesure de régler tous les problèmes liés à notre approvisionnement énergétique. Des tares congénitales pèsent sur elle :
— sa dilution, d'où la nécessité de disposer de grandes surfaces de collecte ;
— son intermittence, due au cycle journalier, au rythme des saisons et à la nébulosité variable du ciel ;
— les coûts des systèmes de captage, dont certains sont encore trop élevés pour permettre un développement rapide de ce type d'énergie.

Toutes ces difficultés de mise en œuvre de l'énergie solaire expliquent pourquoi l'utilisation de ce type d'énergie est restée confinée à des usages très ponctuels, ceux justement où elle pouvait rentrer en compétition techniquement et économiquement avec les autres formes d'énergie.

Comment l'augmentation brutale du prix de l'énergie et les perspectives, certes encore lointaines mais certaines, d'épuisement des réserves traditionnelles d'énergie, vont-elles modifier la place de l'énergie solaire dans l'approvisionnement énergétique du monde ?

On examinera tout d'abord le cas de l'énergie récupérée par des *effets solaires indirects*. Il s'agit essentiellement de l'énergie hydraulique, de l'énergie éolienne et de l'énergie thermique des mers. L'homme est ici confronté à des phénomènes naturels sur lesquels il n'a pas de prise. De nombreux pays néanmoins s'organisent pour tirer le meilleur parti de ces ressources.

Reste ensuite l'utilisation du *rayonnement solaire direct*. Ce rayonnement peut être transformé en chaleur, en électricité ou par photosynthèse en combustibles d'origine biologique (bois, déchets agricoles et une grande part des ordures ménagères). C'est dans cette utilisation directe du rayonnement solaire que les espoirs sont les plus grands. Des applications très diverses existent déjà aujourd'hui et l'on se préoccupe partout de les développer. Cette forme d'énergie est sans nul doute appelée à jouer un rôle important dans les décennies à venir comme énergie d'appoint.

L'énergie solaire ne peut être utilisée que dans un cycle diurne, le jour seulement. Se posent alors des problèmes de stockage pour assurer une production continue.

La réalisation de grandes centrales solaires, productrices d'électricité, reste encore du domaine de l'avant-projet. Aucune réalisation prototype à une échelle industrielle n'existe, et des efforts importants restent à faire pour démontrer les possibilités techniques et économiques de ces réalisations.

Notons enfin, avant de rentrer dans le détail des différentes possibilités d'utilisation de l'énergie solaire, que la notion traditionnelle de ressources ne s'applique pas ici, étant donné le caractère inépuisable de la source énergétique. On utilise quelquefois le terme de ressources renouvelables. En fait, ce type d'énergie nous est imposé, que l'on soit utilisateur ou non. Le seul problème alors est de savoir quelle est la fraction récupérable à des conditions technico-économiques satisfaisantes de la totalité de l'énergie ainsi dispensée.

Énergie solaire indirecte

Nous allons examiner successivement l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne et l'énergie thermique des mers. Les deux premières formes de cette énergie sont utilisées depuis des temps très anciens ; l'énergie thermique des mers reste encore dans le domaine des projets.

Énergie hydraulique

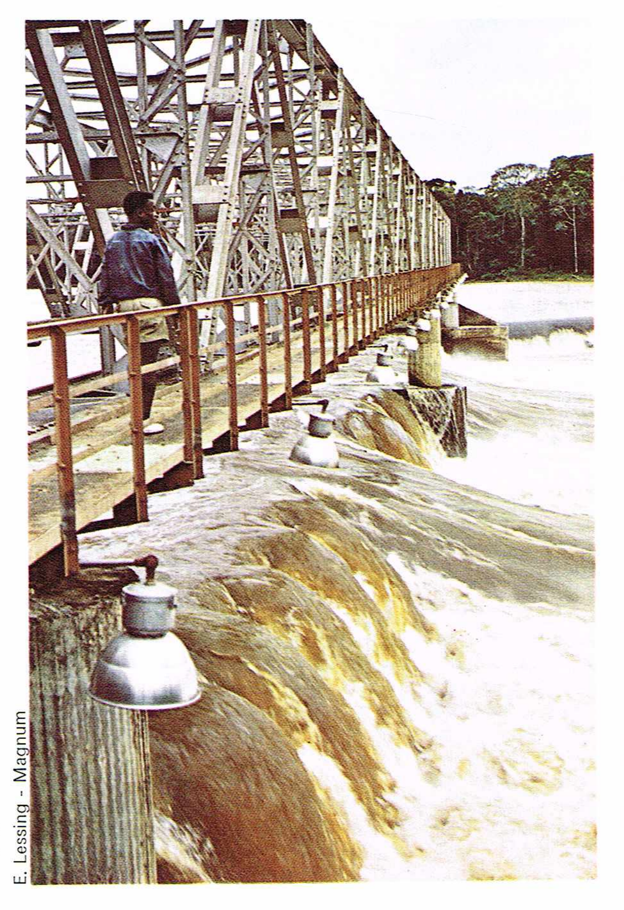
Parmi toutes les sources d'énergie, l'énergie hydraulique a des caractères qui lui sont propres. Les usages d'une réserve d'eau sont multiples : un barrage peut servir à fabriquer de l'électricité, mais il peut servir aussi à contrôler les crues d'une rivière, à faciliter la navigation, à constituer des réserves pour l'irrigation ou la fourniture d'eau publique ; il peut enfin permettre le développement d'activités de loisir par création d'un plan d'eau artificiel. D'autre part, contrairement à d'autres formes d'énergie, l'énergie hydraulique n'a pratiquement pas d'effets thermiques.

Principes de fonctionnement d'une usine hydraulique

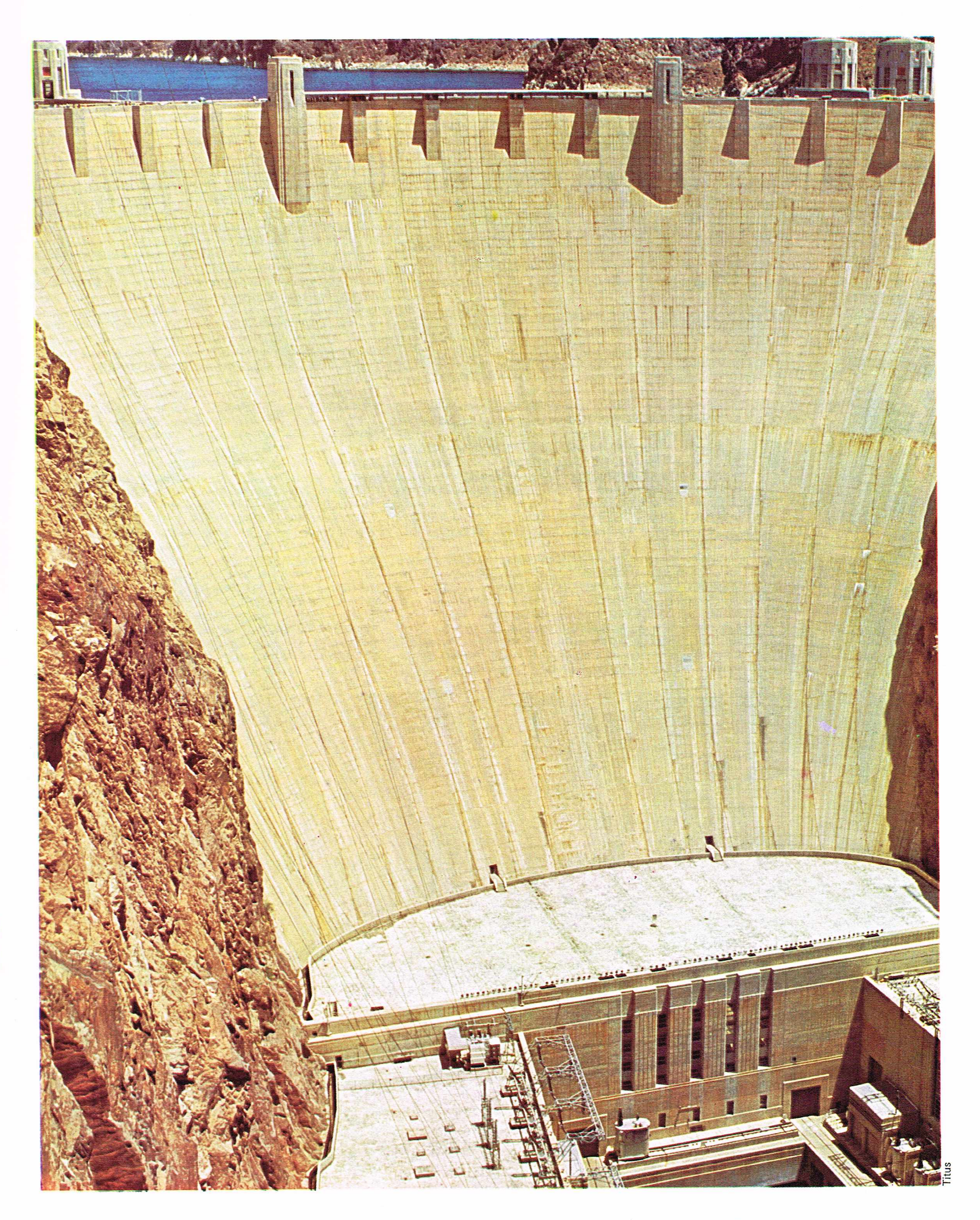
Dans une telle usine, on transforme l'énergie potentielle de l'eau en énergie cinétique par son débit ou sa chute. Cette énergie cinétique est ensuite convertie en énergie mécanique par une turbine (anciens moulins), et enfin, dans les usines hydro-électriques, cette énergie est convertie en énergie électrique par un alternateur couplé à la turbine.

L'énergie totale est directement proportionnelle d'une part à la quantité d'eau P et d'autre part à la hauteur de chute H. L'énergie disponible E peut s'écrire théoriquement : $E = P \times H$. Pour reprendre les expressions données précédemment, P est ici la variable extensive, H la variable intensive. La même quantité d'énergie peut donc être obtenue par une petite quantité d'eau tombant d'une grande hauteur de chute (c'est le barrage de montagne avec des chutes s'exprimant en centaines de mètres) ou par une grande quantité d'eau tombant d'une faible hauteur (c'est l'usine « au fil de l'eau » où tout le débit du fleuve est turbiné sous quelques mètres de hauteur de chute).

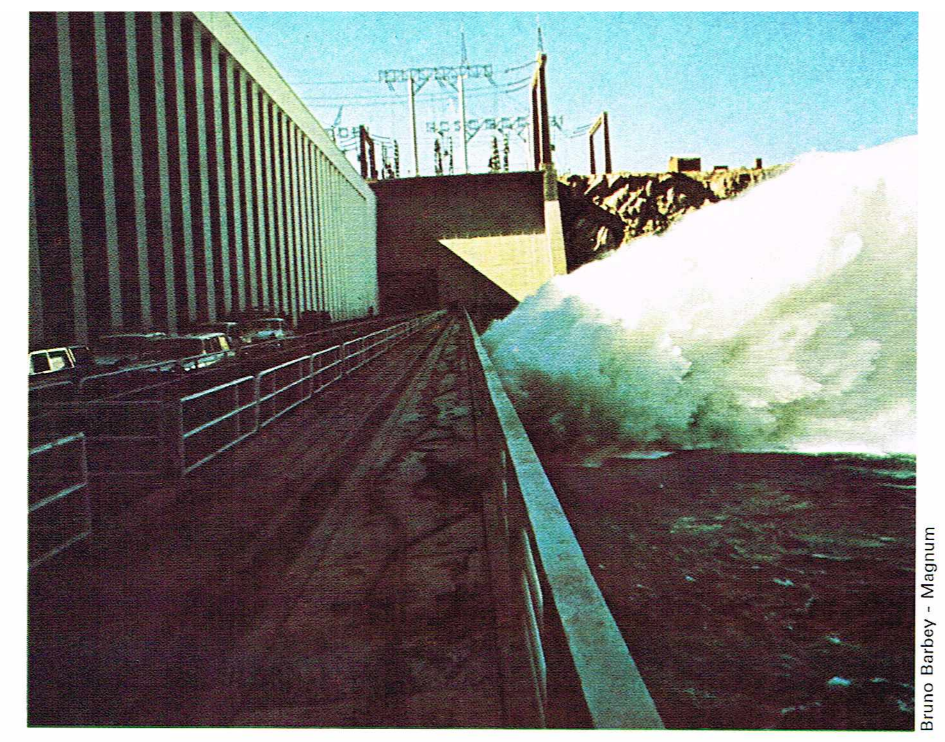
Pour créer une usine hydraulique, il faut donc de l'eau, disponible en quantité suffisante, une hauteur de chute et des utilisateurs enfin à une distance pas trop grande, car on sait que l'énergie électrique se transporte sur une distance qui doit être inférieure à 1 000 km. On envisage aujourd'hui des solutions moins traditionnelles où l'électricité serait utilisée sur place pour fabriquer une nouvelle forme d'énergie (ammoniac par exemple) se transportant plus aisément.


E. Lessing - Magnum

▶ ***Les usages d'une réserve d'eau sont multiples : un barrage peut servir à contrôler les crues d'une rivière, constituer des réserves pour l'irrigation ou la fourniture d'eau publique, ou fabriquer de l'électricité. Le modèle de la construction diffère selon qu'il s'agit d'un barrage de retenue ou de régulation (ci-contre), ou d'un barrage-réservoir comme le* Hoover Dam *qui barre le fleuve Colorado et forme le lac Mead.***



Titus



Bruno Barbey - Magnum

▲ *Barrage d'Assouan en Égypte; la productivité de ce barrage est inférieure à celle qui était attendue.*

Les turbines tout d'abord ont un rendement de 85 à 90 %. Ensuite, la topographie n'est pas toujours favorable à l'établissement des barrages, et une autre partie du potentiel hydraulique est perdue. Enfin et surtout, les débits des cours d'eau sont non uniformes, ce qui empêche, pour des raisons économiques, leur captation totale. Si l'on veut utiliser les équipements 95 % du temps, on ne peut récupérer que 6 % de l'énergie totale. La puissance installée serait alors de 600 000 MW et la production de $4,6 \times 10^6$ GWh. Si l'on essaie de dimensionner les équipements pour le débit moyen, on peut récupérer alors 16 % de l'énergie totale, soit $12,5 \times 10^6$ GWh avec une puissance installée de 3 000 000 MW. Le facteur de charge des équipements serait alors de 50 % seulement.

Si l'on compare ces chiffres à ceux des réalisations actuelles, on notera qu'il est possible d'augmenter encore la participation de l'énergie hydraulique à la satisfaction de nos besoins. En effet, en 1974, la puissance mondiale installée était de 350 000 MW produisant une énergie de $1,3 \times 10^6$ GWh, soit 2 % de la consommation mondiale. Mais on est obligé de conclure que l'hydraulique, même en se développant sensiblement, ne peut jouer qu'un rôle mineur dans la production totale d'énergie.

Évaluation de l'énergie récupérable

On estime à 400 000 km^3 environ le volume d'eau des océans s'évaporant par an sous l'action de la chaleur du Soleil. Les 3/4 de ce volume d'eau reviennent dans les océans sous forme de pluie ; 100 000 km^3 donc tombent sur la terre ferme sous forme de neige ou de pluie. Une grande partie de cette eau, 63 000 km^3, est perdue par évaporation, ce qui laisse 37 000 km^3 qui retournent vers les mers par les fleuves.

Si l'on estime à 800 m la hauteur moyenne des continents au-dessus du niveau de la mer, on calcule par application de $E = P \times H$ que l'énergie hydraulique annuelle totale des cours d'eau est environ de 80×10^6 GWh ou 290×10^6 TJ (térajoules). Cette quantité d'énergie n'est que légèrement supérieure à la consommation annuelle mondiale d'énergie actuelle, ce qui montre que cette source d'énergie inépuisable pourrait subvenir juste à nos besoins si on pouvait l'utiliser complètement. Ce n'est malheureusement pas le cas, et, pour différentes raisons, seule une faible fraction de ce potentiel hydraulique total peut être récupérée.

Autres limitations du développement de l'énergie hydraulique

Nous avons vu qu'un certain nombre de facteurs techniques nous empêchaient de tirer parti au maximum du potentiel hydro-électrique. D'autres raisons vont encore limiter le développement de cette forme d'énergie.

Le facteur géographique tout d'abord : de nombreuses chutes se trouvent dans des régions isolées (Afrique, ou Amérique du Sud) où la production importante d'énergie électrique serait de peu d'utilité. Cette objection peut être levée, on l'a dit, par une conversion sur place de l'énergie électrique en une autre forme d'énergie, plus facilement transportable et utilisable pour les pays avoisinant le barrage.

L'autre facteur, qui sera sans doute plus limitatif, est celui de la protection de l'environnement. La création d'une retenue d'eau soulève en effet des problèmes très divers. Tout d'abord, les expropriations sont très mal supportées par les populations. Le public est d'autre part très sensibilisé aujourd'hui à la protection des sites. Le projet de barrer, par exemple, le fleuve Colorado, aux États-Unis, dans la région du Grand Canyon, a dû être abandonné, en raison de la volonté générale de conserver ce site unique au monde dans son état naturel.

De plus, le barrage des fleuves, qui paraît *a priori* plus facile, rencontre une autre difficulté. Très souvent, les meilleures terres agricoles sont situées dans les plaines alluvionnaires, justement le long des fleuves. La construction de barrages, même de faible hauteur de chute, inonde des terres de bonne qualité. Cette limitation jouera très certainement dans les régions très peuplées de l'est et du sud de l'Asie. Enfin d'autres raisons d'ordre écologique pèseront sur les futurs projets. L'opinion publique connaît bien à présent les effets surprenants et totalement imprévus du barrage d'Assouan en Égypte. La légendaire fertilité des rives du Nil a disparu avec la régularisation du cours du fleuve. Le limon bloqué dans le barrage doit être aujourd'hui compensé par des engrais chimiques. Une autre conséquence désastreuse de la stérilisation de l'eau qui s'écoule du barrage est la disparition de la pêche dans le delta du Nil. La régularisation du fleuve a causé la prolifération de parasites qui sont à l'origine d'une grave maladie (schistosomiase) dont les ravages se sont amplifiés depuis la mise en service du barrage. Enfin la productivité du barrage est inférieure à celle qui était attendue : le lac Nasser au fond poreux ne s'est pas étanché naturellement comme on l'espérait, et l'évaporation est beaucoup plus forte que prévue.

En conclusion, la création de grandes usines hydrauliques est reconnue aujourd'hui comme une entreprise difficile, dont les conséquences écologiques peuvent être très graves. Pour cette raison, certains pays comme la Suède ont choisi de renoncer définitivement à l'énergie hydraulique. De nouvelles usines seront très certainement construites dans le monde d'ici à l'an 2000. La production d'énergie hydraulique augmentera en valeur absolue, mais il y a tout lieu de penser que sa participation en valeur relative décroîtra sensiblement.

▼ *Les chutes du Zambèze à Victoria. Les ressources hydrauliques se répartissent environ pour 30 % en Afrique, 30 % dans les deux Amériques, 33 % en Asie, 6 % en Europe occidentale et 1 % en Océanie.*



Yan Berry : Magnum

Énergie éolienne

Le vent a toujours été considéré dans le passé comme une source de puissance, sur terre comme sur mer. Mais il a rapidement été éliminé à la fin du siècle dernier pour la propulsion des navires et la fourniture d'électricité, d'abord par le charbon, ensuite par le pétrole et pour tous les usages directs par l'électricité elle-même.

Provenant des effets thermiques du rayonnement solaire direct, l'énergie éolienne fait donc partie des énergies aux sources inépuisables : le vent soufflera aussi longtemps que le Soleil brillera et que la Terre disposera d'une atmosphère. Cette forme d'énergie a donc les mêmes avantages que l'énergie solaire, mais malheureusement aussi les mêmes défauts : l'instabilité et la dilution. Elle est non seulement dispersée sur toute la surface de la terre mais également dans toutes les couches de l'atmosphère. De plus, les vents soufflent plus régulièrement dans le haut de l'atmosphère. La captation de toute l'énergie éolienne exigerait des surfaces actives en quantités considérables.

Description d'une machine éolienne

Les éoliennes se composent généralement d'une structure qui supporte la machine proprement dite. Celle-ci comprend une voilure, à pales fixes ou variables, montée sur un arbre horizontal qui est couplé au système récepteur. Le récepteur est en général une génératrice électrique; on peut également actionner directement un récepteur mécanique comme une pompe à eau.

La puissance de ces machines peut varier entre quelques dizaines de watts jusqu'à plusieurs centaines de kilowatts. Les problèmes techniques, tels que le choix de la tension (alternative ou continue), la régulation de la vitesse, la fiabilité des composants mécaniques et électriques, ne sont pas encore parfaitement résolus, ainsi que le problème de stockage de l'énergie produite en dehors des périodes de consommation.

Parmi les grosses machines construites, une des plus connues est celle de « Grandpa's KNDB » dans l'État du Vermont aux États-Unis. Le pylône support avait une hauteur de 30 m; le diamètre de l'hélice bipale était de 53 m. Cette machine, d'une puissance de 1 250 kW, a fonctionné de façon satisfaisante de 1941 à 1945. Pour alimenter en électricité une maison individuelle, il faudrait une machine d'une puissance de 5 à 10 kW, ce qui représente une hélice d'une dizaine de mètres de diamètre.



Alain Nogués - Sygma

▲ *L'énergie éolienne fait partie des énergies aux sources inépuisables : le vent soufflera aussi longtemps que le Soleil brillera et que la Terre disposera d'une atmosphère.*

Évaluation de l'énergie récupérable

On évalue la puissance du vent dans toute l'atmosphère à 300×10^{12} MW. L'énergie dissipée correspondante est de $2\,600 \times 10^{12}$ GWh/an. Seulement 1/4 de cette puissance est développée au-dessus des terres, ce qui est tout à fait considérable. Son exploitation totale couvrirait plus de 100 fois nos besoins actuels. Malheureusement cette énergie est pratiquement inaccessible, et la fraction utilisable dans des conditions techniques et économiques raisonnables serait de l'ordre de 1 à 20 millions de MW.

Développement de l'énergie éolienne

Même si certains projets de grande envergure ont été étudiés (300 000 éoliennes de 3 000 kW chacune couvrant les grandes plaines des États-Unis par exemple), cette forme d'énergie ne paraît pas capable de fournir les grosses quantités d'énergie dont les pays industrialisés ont besoin. En revanche, les machines éoliennes de petites et moyennes puissances peuvent jouer un rôle notable dans la satisfaction des besoins énergétiques de

▼ *Les machines éoliennes de petites et moyennes puissances peuvent jouer un rôle notable dans la satisfaction des besoins énergétiques de certains pays : ici, un « champ » d'éoliennes aux environs de Palma (Majorque).*

Photo Marc Garanger

certains pays en voie de développement. Les éoliennes sont en effet parfaitement adaptées à la fourniture d'énergie mécanique ou électrique dans des régions isolées où la demande est faible. Un certain nombre d'habitations individuelles dans des pays comme la France pourraient être équipées de machines éoliennes. Le coût de ces machines est encore cependant trop élevé pour que l'on assiste à une croissance rapide de l'énergie produite à partir du vent.

Dans la voie des petites et moyennes machines, des études sont en cours dans de nombreux pays. De nouvelles solutions pour le stockage sont examinées. On s'intéresse également à la production d'électricité par des aérogénérateurs raccordés au réseau de distribution électrique, ce qui élimine le problème du stockage, crucial dans l'application individuelle.

Source abondante et inépuisable, l'énergie éolienne en raison des difficultés de captation restera selon toute vraisemblance globalement une énergie d'appoint; ce qui ne signifie pas que cette forme d'énergie soit condamnée à disparaître. Bien au contraire, on peut penser que l'énergie éolienne peut apporter une solution élégante et économique à la satisfaction de certains besoins énergétiques.

Avant de clore ce paragraphe sur l'énergie éolienne, il faut mentionner une autre possibilité de captage de cette forme d'énergie par le mouvement des vagues. Cette énergie de la houle, due au vent, ne doit pas être confondue avec l'énergie thermique des océans qui sera examinée ci-après. Certains spécialistes pensent à juste raison qu'il existe dans le mouvement de la houle des ressources qui méritent de retenir l'attention. Des projets ambitieux ont été envisagés. Compte tenu cependant des résultats décevants de quelques essais, les réalisateurs semblent découragés et pour l'instant on ne peut être que très réservé sur l'avenir de cette forme d'énergie.

Énergie thermique des océans

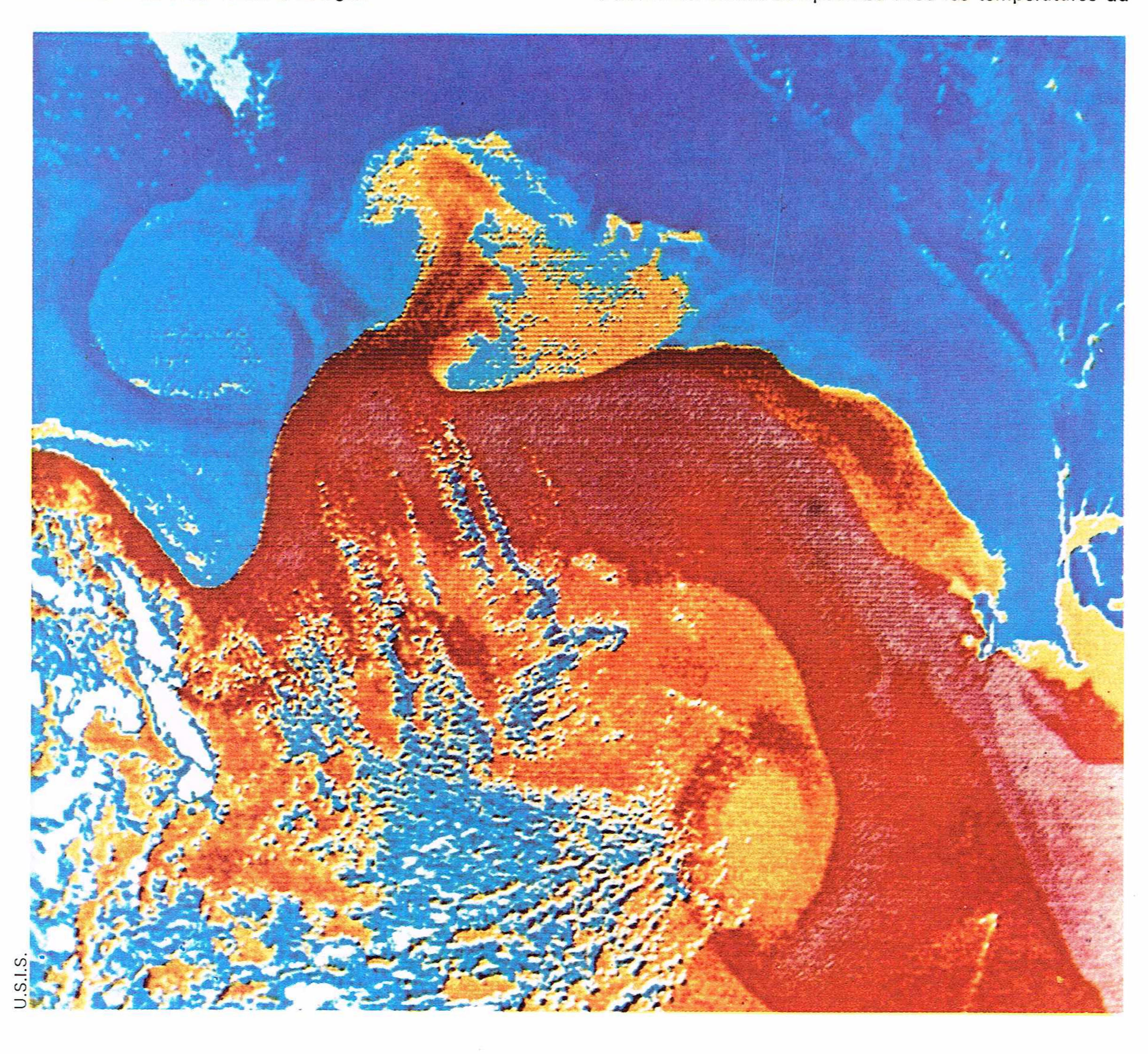
Une partie importante du rayonnement solaire est absorbée par les océans qui sont des capteurs naturels remarquables par leur taille. L'énergie solaire est alors transformée en chaleur, et des savants et des chercheurs se sont demandés comment cette énergie stockée dans les couches superficielles des océans pouvait être récupérée.

La France a joué un rôle de pionnier, puisque c'est le physicien J. d'Arsonval qui, en 1881, émit l'idée originale de récupérer l'énergie thermique des océans. En 1919, G. Claude construisit la première installation du genre à Cuba. D'une puissance très faible, cette réalisation avait échoué en raison de la mauvaise tenue mécanique des tuyauteries immergées en mer profonde. L'E. D. F. a montré que ce problème pouvait être résolu en relançant, en 1956, deux essais en Côte-d'Ivoire. Les études avaient été arrêtées à cette époque en raison de l'arrivée de l'énergie nucléaire que l'on entrevoyait comme imminente.

De nouvelles études de réalisation sont lancées aujourd'hui dans certains pays, en particulier aux États-Unis.

Description d'une « future » usine

L'eau superficielle des océans est chauffée par le Soleil et se déplace vers le pôle où elle est refroidie. Une partie de cette eau revient superficiellement en créant des courants froids, mais l'autre partie revient à contre-courant en dessous du courant chaud. Le *Gulf Stream* constitue un bon exemple de ce phénomène avec son gradient thermique vertical de 20 °C sur une hauteur de 1 000 m. Sur ce gradient thermique, il est possible de bâtir un cycle thermodynamique en utilisant bien évidemment un fluide de travail dont les caractéristiques d'ébullition soient compatibles avec les températures du



U.S.I.S.

▶ *Photographiés d'un satellite, les courants chauds et froids du Gulf Stream au large de la Floride (en haut, à gauche). On observera que les eaux très chaudes apparaissent en violet, en rouge et en différentes nuances d'orangé; les eaux plus froides en bleu, et les eaux très froides en blanc.*

cycle. Le fluide est alors vaporisé dans un échangeur placé dans la source chaude, la vapeur est alors détendue dans une turbine et le fluide retransformé en liquide par l'eau plus froide des profondeurs (*fig.* 2).

Les fluides utilisables pour ce type de cycle sont l'ammoniac, le propane ou le fréon. Une centrale fonctionnant suivant ce principe serait gigantesque, étant donné le rendement thermodynamique très faible du cycle.

Évaluation de l'énergie récupérable

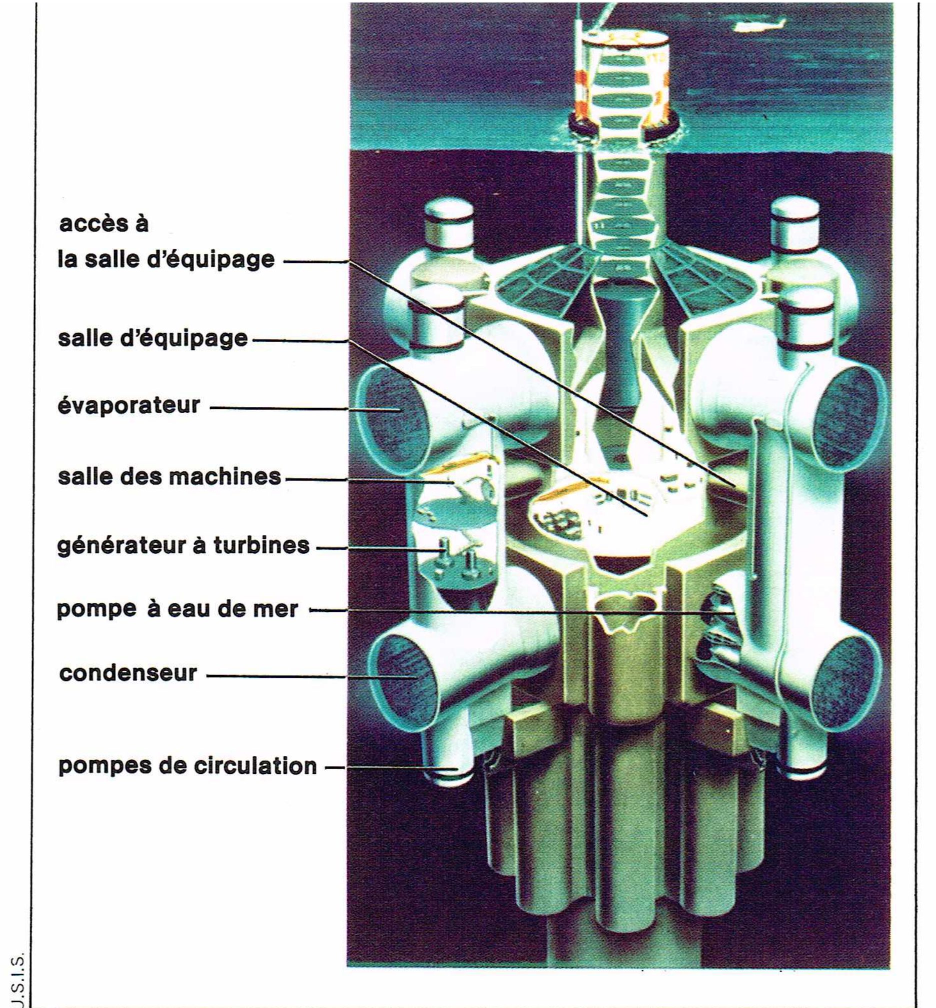
On a estimé la puissance qui pourrait être extraite du *Gulf Stream* au large de la Floride. Le débit est de 2 200 km³/jour avec un gradient vertical de température de 20 °C. Ces caractéristiques représentent une puissance de 21 millions de MW, soit une production annuelle de 180 millions de GWh. Cette source énergétique est considérable, puisqu'elle représente 30 fois la demande mondiale actuelle. D'autres sites pourraient être trouvés qui multiplieraient par 10 environ les chiffres ci-dessus. Pour différentes raisons, sites non favorables, difficultés de transport de l'énergie, on estime qu'à peine 1 % de cette ressource est récupérable.

Développement de l'énergie thermique des océans

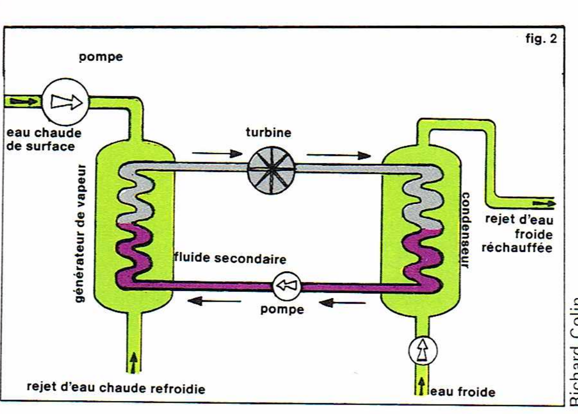
L'utilisation de cette forme d'énergie est à l'étude. Certains pensent améliorer le rendement du cycle en utilisant le rejet d'eau chaude de centrales nucléaires pour améliorer la température haute, et des icebergs remorqués à proximité de l'usine pour abaisser la température de la source froide. Les influences écologiques de telles usines qui réchaufferaient les eaux froides du fond des mers restent encore à apprécier.

La difficulté de transport de l'énergie électrique pourrait être résolue par conversion sur place de l'énergie électrique produite. Il serait intéressant par exemple de fabriquer de l'eau douce ou de l'hydrogène par électrolyse de l'eau.

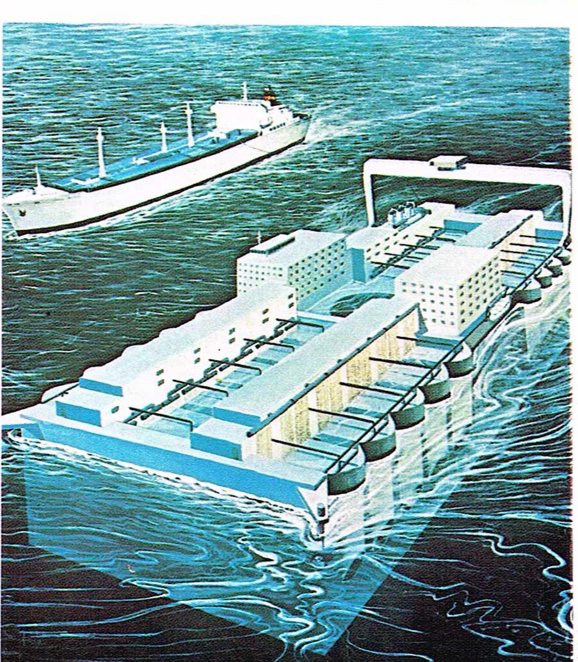
En conclusion, nous sommes encore devant une source d'énergie renouvelable mais dont les difficultés de captation rendent l'exploitation très hypothétique. On peut penser qu'aucun projet de grande envergure ne verra le jour avant l'an 2000.



▲ *Maquette d'un générateur conçu par Lockheed pour produire de l'énergie électrique à partir de l'énergie thermique des océans. Cette plate-forme de 300 000 tonnes et d'une hauteur équivalente à un immeuble de 150 étages ne dépasserait la surface de l'eau que d'une vingtaine de mètres et pourrait alimenter en électricité une ville de 100 000 habitants.*



◄ *Figure 2 : schéma d'une usine thermo-électrique utilisant l'énergie thermique des océans.*



◄ *Représentation d'une usine de fabrication d'ammoniac à partir de l'énergie des océans qui pourrait couvrir plus de 40 % des besoins en engrais de la production alimentaire des États-Unis. Le principe est fondé sur l'électrolyse des eaux tropicales, inépuisables sources d'hydrogène, celui-ci étant ensuite recombiné à l'azote atmosphérique pour obtenir de l'ammoniac. Les premières usines de ce type pourraient entrer en service en 1986.*

Énergie solaire directe

Le rayonnement solaire peut être utilisé de trois façons différentes si l'on considère le type de conversion d'énergie associé au captage de ce rayonnement. On peut en effet convertir le rayonnement solaire en énergie thermique, en énergie électrique ou en énergie chimique.

L'énergie disponible avant conversion est en un lieu donné toujours la même. Rappelons qu'une surface de 100 m² reçoit en moyenne 500 000 kcal pour une journée d'ensoleillement de 8 h. Il faudrait pour obtenir cette même chaleur brûler 80 kg de charbon ou 55 l d'essence. Après conversion, l'énergie disponible se trouve plus ou moins réduite selon le rendement de l'opération. Mais ce n'est pas ici la recherche d'un bon rendement qui fixe la conversion à utiliser, mais plutôt l'utilisation que l'on veut faire de cette énergie ou les possibilités de la technologie existante. Chaque fois que ce sera possible, on évitera les conversions multiples qui gaspillent l'énergie pour choisir une conversion simple : on transformera par exemple le rayonnement solaire en chaleur si l'on veut faire du chauffage.

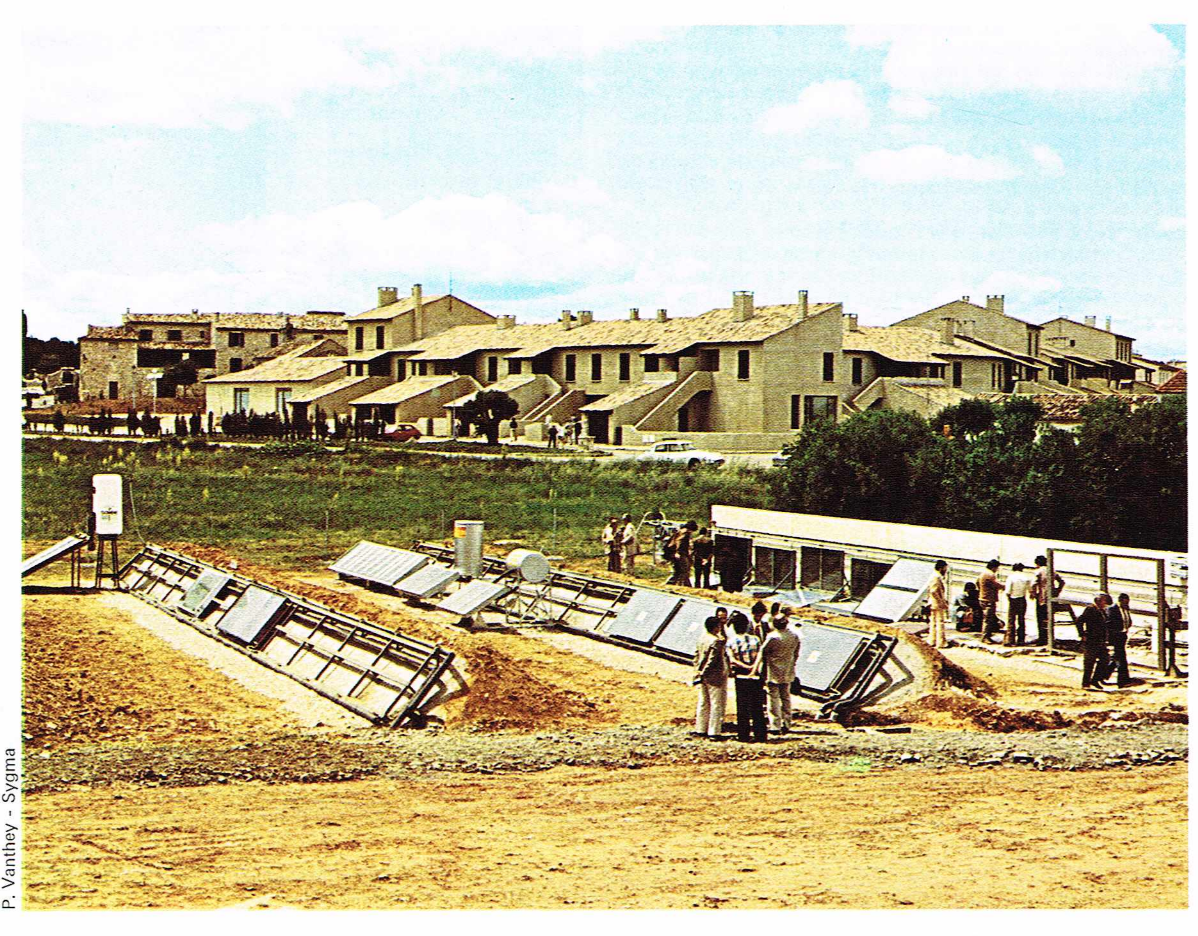
Les trois types de conversion vont donc être successivement examinés.

Conversion en énergie thermique

La conversion se fait dans un capteur appelé aussi « insolateur ». Tous les corps exposés au rayonnement solaire absorbent, en fonction de leur couleur, plus ou moins de ce rayonnement et le transforment en chaleur. Cette énergie thermique est ensuite restituée à l'environnement selon les mécanismes habituels de transmission de la chaleur : conduction, convection ou rayonnement.

Tous les insolateurs, quel que soit leur type, ont un meilleur rendement s'ils utilisent l' « effet de serre ». La lumière piégée dans le collecteur est ainsi utilisée au maximum. De nombreux types d'insolateurs ont été imaginés, et il n'est pas possible de les décrire tous. On

▶ *L'énergie solaire directe peut être convertie en trois types d'énergie : thermique, électrique et chimique. Le captage du rayonnement dans le cas d'une conversion en énergie thermique se fait dans des* insolateurs *dont on voit ici une installation.*



P. Vanthey - Sygma

peut distinguer deux grandes familles : les insolateurs sans effet de concentration qui conviennent aux applications à basse température, et les insolateurs avec effet de concentration qui permettent les applications à haute température.

Insolateurs sans effet de concentration

Ces appareils sont le plus souvent de forme plane. Ils sont constitués d'une surface de couleur sombre destinée à être exposée au soleil derrière un vitrage qui permet l'effet de serre. La chaleur captée par l'insolateur est transmise à un fluide par convection, ou à un solide par conduction. Les appareils de ce type permettent d'atteindre sans difficultés particulières des températures maximales de 80 à 85 °C. Les applications déjà envisagées ou réalisées sont les suivantes :

— *Chauffe-eau à usages domestiques ou industriels*

Ce type d'appareil s'est développé très rapidement dans les pays à fort ensoleillement (Israël, Japon en particulier). Dans des pays tempérés comme la France, le rayonnement solaire peut ne pas être suffisant pendant une partie de l'année, et il est nécessaire de recourir à un chauffage mixte électro-solaire. Ces appareils permettent dans leurs applications industrielles de réchauffer d'autres fluides que l'eau.

— *Distillateur*

D'un principe identique à celui du chauffe-eau, le distillateur permet par évaporation et condensation de recueillir un fluide purifié : eau distillée à partir d'eau saumâtre par exemple.

— *Sécheur*

Des études de séchage solaire sont en cours dans certains pays africains. Les applications visent le séchage de produits agricoles (avec déshydratation partielle), de la viande, des briques, etc.

— *Chauffage des bâtiments*

Le bâtiment est équipé d'insolateurs en face sud ou en toiture. Le chauffage peut être assuré par rayonnement interne de parois ou par circulation d'air chaud ou d'eau chaude. Un chauffage d'appoint de type électrique doit être prévu. La complémentarité de l'énergie solaire et de l'énergie électrique dans l'habitat est évidente, car elles demandent toutes deux une très bonne isolation.

De nombreux prototypes de maisons solaires ont été construits en France et à l'étranger. Ces expériences ont montré que l'énergie solaire pouvait représenter pour le chauffage d'une maison de taille moyenne jusqu'aux 3/4 de l'énergie nécessaire au maintien d'une température de 20 °C. Pour obtenir de tels résultats, un bon isolement de la structure d'habitation est nécessaire. Le coût de la construction est donc supérieur, et les insolateurs, qui ne sont pas fabriqués en grande série, sont onéreux, ce qui augmente encore le coût d'investissement. Celui-ci doit être amorti en 3 ou 4 ans, et on peut penser que des programmes quantitatifs de construction solaire seront lancés dans différents pays dans un proche avenir.

Insolateurs avec effet de concentration

La concentration du rayonnement est effectuée à l'aide de miroirs. Les matériaux utilisés peuvent être divers : le verre argenté ou aluminé, l'aluminium, etc. Les formes sont paraboloïques pour concentrer le rayonnement en un point ou cylindro-paraboloïques pour le concentrer sur un collecteur linéaire.

Cet effet de concentration permet d'atteindre des températures très élevées. En revanche, il est nécessaire de bien orienter les miroirs en fonction du déplacement du Soleil, et des dispositifs de réglage, complexes et coûteux s'ils sont automatiques, doivent être prévus. Les applications sont les suivantes.

— *Cuisinière*

Ces appareils de construction simple munis d'un ou de plusieurs miroirs permettent d'atteindre des températures de 200 à 300 °C. Ils sont utilisés en Afrique pour la cuisson des aliments.

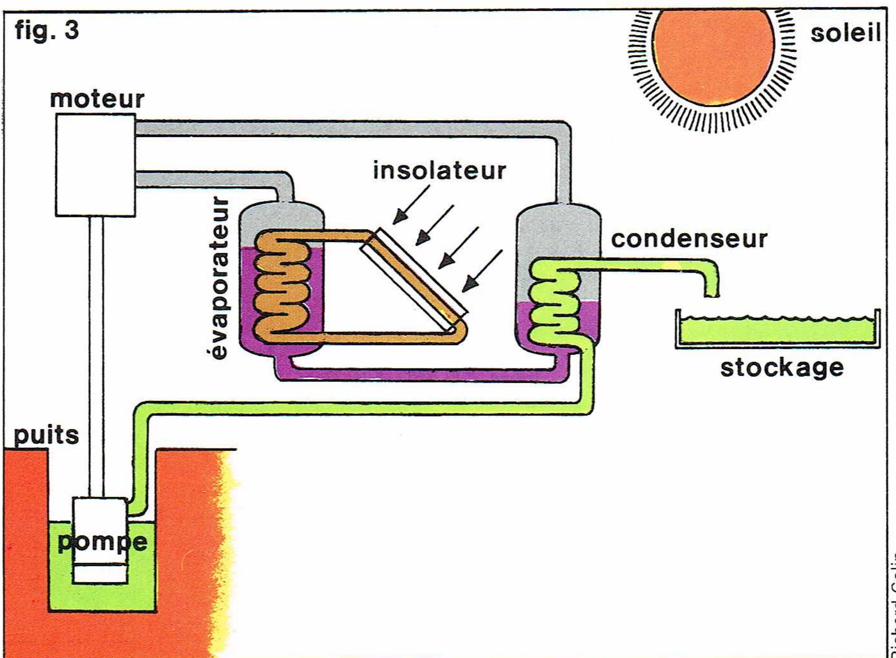
— *Réfrigérateur*

Le niveau thermique élevé, du fait de la concentration, permet de faire fonctionner tous les systèmes de réfrigération habituels pour produire de la glace ou faire du conditionnement.

— *Fours solaires*

On trouve des réalisations de tailles très diverses qui permettent de disposer, à des fins généralement scientifiques (on peut chauffer un échantillon sans le polluer), de températures allant de quelques centaines de degrés à plus de 4 000 °C.





— *Moteur thermique*

La voie thermique peut être utilisée pour fabriquer de l'énergie mécanique, et éventuellement ensuite de l'énergie électrique en accouplant un générateur au moteur thermique.

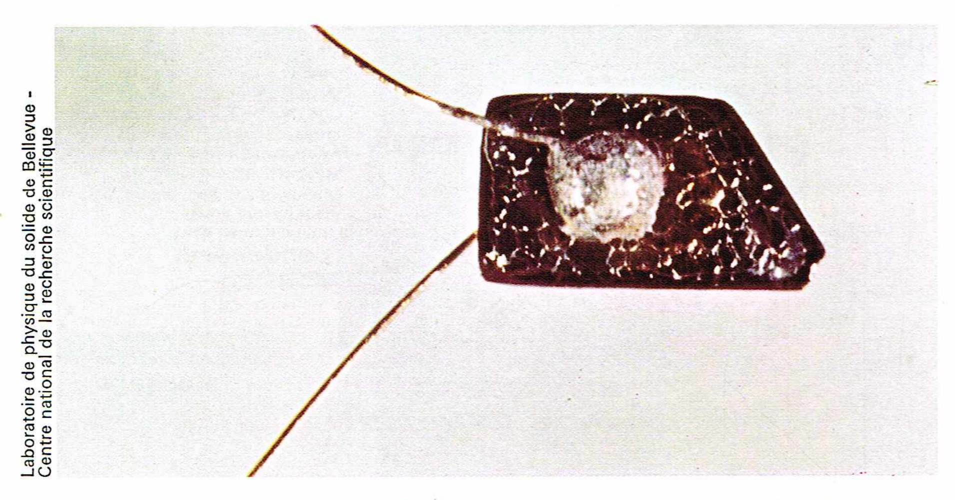
Des réalisations intéressantes utilisant ce principe sont déjà en service dans certains pays d'Afrique et d'Amérique latine. Il s'agit généralement de pompes à pistons qui sont utilisées pour relever l'eau d'un puits ou d'un forage dans une nappe. Un cycle thermique utilisant un fluide convenable (butane par exemple) est établi entre une source chaude constituée par les insolateurs et une source froide constituée généralement par l'eau de la nappe que l'on veut pomper (*fig.* 3).

▲ ***A gauche, une des premières maisons à chauffage solaire, présentée au Village de France de la Foire de Paris (1973) et dessinée par l'architecte français J. Michel.***

A droite, figure 3 : schéma de principe d'une installation de pompage solaire ; la source froide est constituée par l'eau pompée.

▼ ***Le four solaire d'Odeillo (Pyrénées, France).***

Martine Franck - Viva


Laboratoire de physique du solide de Bellevue - Centre national de la recherche scientifique

On peut par ce moyen fabriquer de l'électricité, mais aucune installation d'envergure de ce type n'a été jusqu'à ce jour réalisée. Des projets sont en cours d'étude, mais la fiabilité technique et l'économie de telles réalisations comportent encore trop d'incertitudes pour que la décision de les construire soit prise.

L'énergie solaire étant intermittente, on sait qu'à tout système de captation, il faut associer une fonction de stockage pour satisfaire la demande de consommation en dehors des périodes de production. Dans l'utilisation thermique du rayonnement solaire, cette fonction « stockage » est en général facilement réalisée. L'eau chaude peut être conservée dans un ballon, l'eau pompée dans un bassin, le froid produit sous forme de glace, etc.

Conversion en énergie électrique

La cellule photovoltaïque ou photopile est une sorte de pile électrique qui ne produit du courant électrique que lorsqu'elle reçoit de la lumière et qui en fournit d'autant plus que l'éclairement est vif. C'est le mécanisme de l'effet photo-électrique qui est utilisé dans cet appareil.

Différents types de cellules ont été imaginés. Ces cellules sont l'objet de nombreuses applications : notamment, pour la mesure d'un flux lumineux dans les posemètres et comme détecteur de présence dans de nombreux usages industriels. Utilisées pour capter l'énergie solaire, les photopiles vont transformer le rayonnement reçu en énergie électrique. Elles ont été utilisées avec succès sur de nombreux satellites artificiels pour fournir le courant d'alimentation des appareils de bord.

Il est difficile d'extrapoler une centrale terrestre à partir de ces appareils qui ont été développés en vue d'applications stratégiques et pour lesquels les caractéristiques de rendement, de poids et de longévité primaient les considérations de coût. La mise au point de photopiles terrestres qui résistent en particulier aux agressions atmosphériques qui n'existent pas dans l'espace va demander encore des études. On pense néanmoins qu'il sera possible de construire des photopiles satisfaisantes à un coût raisonnable dans un délai de 5 ans. L'objectif est ambitieux, car c'est une réduction du prix actuel d'un facteur supérieur à 100 qu'il faut réaliser pour rendre l'énergie solaire compétitive avec les autres formes actuelles d'énergie.

Le rendement de ces photopiles est actuellement de 10 % environ et sera amélioré dans les années qui viennent (le rendement théorique est voisin de 25 %). La surface de 1 m², recevant en moyenne sous nos latitudes 200 W de rayonnement solaire, peut restituer si elle est recouverte de photopiles d'un rendement de 20 % une puissance de 40 W. C'est donc au moins une surface de 25 m² qui serait nécessaire pour produire 1 kW, et une centrale de 100 MW exigerait une surface minimale de 2,5 km².

Les surfaces neutralisées au sol par une centrale solaire sont relativement importantes, et le choix de sites propres à implanter une centrale solaire importante pourrait se révéler difficile. Pour éviter ces difficultés et profiter de plus du rayonnement solaire maximal qui existe au-dessus de l'atmosphère de la Terre, une firme américaine a imaginé de capter l'énergie du Soleil à l'aide d'une station orbitale. Le projet est d'envergure, et son exécution demande une maîtrise des techniques spatiales qui est encore loin d'être atteinte. Jugeons-en plutôt ! La surface de captage serait constituée de

▼ *Le satellite météorologique soviétique* **Météor** *« déployant » ses panneaux solaires constitués de petites cellules de silicium de 1 cm² de surface, et destinés, lors des missions de longue durée, à fournir, par conversion, l'énergie électrique nécessaire au fonctionnement de ses appareils électroniques.*

Novosti

2 carrés de 5 km de côté, soit une superficie totale de 50 km². Cette station serait mise sur orbite à 36 000 km de la Terre, ce qui en ferait un satellite stationnaire d'un poids de 10 000 t ; il exigerait pour son montage 500 vols de navette. La transmission de la puissance électrique se ferait au travers de l'atmosphère par micro-ondes de 2 500 mégahertz, peu absorbées. Il s'agit du projet Glaser de la firme Arthur D. Little.

Conversion en énergie chimique

Depuis quelque temps, on fonde des espoirs sur la conversion de l'énergie solaire en énergie chimique, ou photochimie. La photosynthèse est un des processus photochimiques essentiels pour le maintien de la vie végétale. C'est pourquoi on peut dire que les végétaux sont les premiers capteurs solaires. Le gaz carbonique et l'eau sont transformés en nouvelles cellules végétales (hydrates de carbone) et en oxygène par action du rayonnement solaire absorbé par les pigments des cellules vertes de la plante. L'énergie solaire est captée, puis transformée en énergie chimique stockable.

La photosynthèse joue un rôle primordial dans l'agriculture, mais les végétaux peuvent être produits également à des fins énergétiques. Il ne faut pas oublier que le bois a été pendant des millions d'années le seul combustible disponible. Il est encore très utilisé aujourd'hui. Si les combustibles d'origine végétale ne représentent aujourd'hui que 2 à 3 % de la consommation mondiale d'énergie, près de la moitié de la population mondiale dépend uniquement de ces ressources.

La croissance des végétaux est un phénomène très lent, et la plupart des recherches actuelles visent à accélérer le processus de photosynthèse. Les algues à croissance rapide sont particulièrement étudiées. Après séchage, effectué dans des fours solaires, on pourrait disposer de combustibles solides. Au lieu de sécher, on peut aussi par fermentation en extraire du gaz méthane (gaz des marais). D'autres possibilités existent, comme celle de fabriquer de l'alcool, qui est un excellent combustible liquide.

La conversion de l'énergie solaire en énergie chimique par l'intermédiaire des végétaux, appelée conversion bio-énergétique, paraît donc susceptible de se renouveler. Est-elle adaptée à une production massive d'énergie dans des conditions acceptables, en particulier à un coût compétitif ? La réponse à cette question doit être nuancée ; elle est sans doute positive si ce type de conversion est utilisé dans des pays en voie de développement ne disposant pas de ressources énergétiques traditionnelles.

Développement de l'énergie solaire

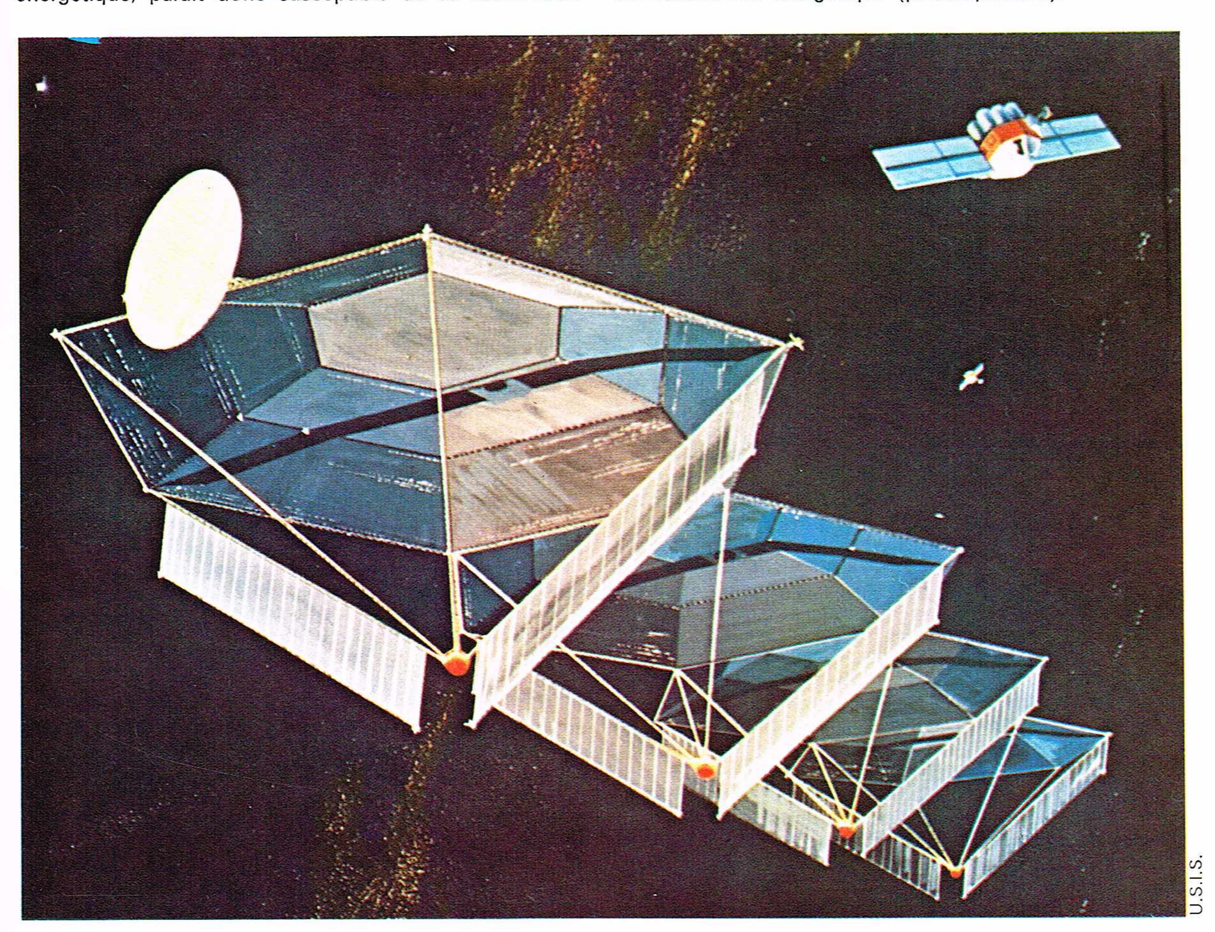
Les utilisations thermiques de l'énergie solaire immédiatement applicables devraient connaître dans l'habitat un développement important d'ici à la fin du siècle. On pense que 30 % à 35 % de l'énergie domestique pourraient être satisfaits en France par l'énergie solaire ; l'énergie domestique représentant 25 % de la consommation d'énergie nationale, le « solaire » pourrait assurer 10 % de notre consommation en l'an 2000. C'est un objectif réaliste mais néanmoins ambitieux, car il suppose des investissements importants et donc la mise en œuvre d'une politique délibérée.

Les applications électriques et bio-énergétiques ne connaîtront pas dans des pays comme la France de développements importants d'ici à la fin du siècle. Les procédés correspondants auraient en effet du mal à supplanter les procédés existants. La question se pose tout à fait différemment dans les pays du tiers monde qui ne disposent pas de ressources énergétiques, et ce sont les plus nombreux. Le financement de leur croissance est très préoccupant, car ils ne peuvent pas se procurer facilement les combustibles dont ils ont besoin, étant donné leurs coûts élevés payables en devises. Il apparaît donc que, pour ces pays, généralement très bien ensoleillés, l'énergie solaire constitue une source d'énergie très prometteuse.

Universelle, inépuisable et gratuite, l'énergie solaire, en dépit des difficultés liées à sa mise en œuvre, devrait s'imposer assez rapidement dans de nombreux pays en voie de développement.

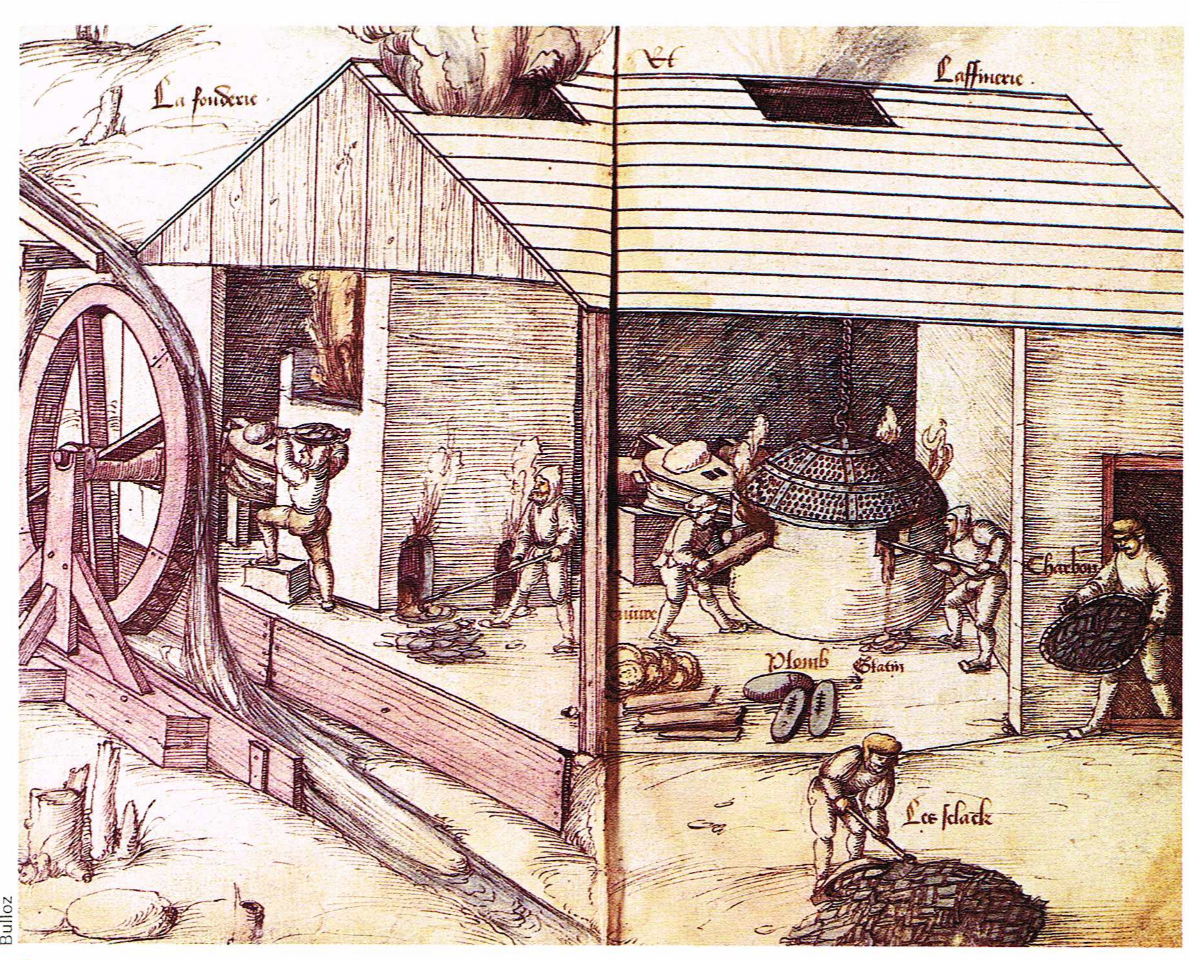
Au-delà de l'an 2000, l'importance que prendra l'énergie solaire dans le monde est difficile à estimer aujourd'hui, car elle dépendra des percées technologiques dans les domaines de la conversion photo-électrique et de la conversion bio-énergétique (photosynthèse).

◀ Page ci-contre, en haut, utilisées pour capter l'énergie solaire, les photopiles transforment le rayonnement reçu en énergie électrique. Pour être rentable, ce type d'élément devrait coûter environ 5 dollars, or il en coûte actuellement 175. Seuls les vols spatiaux peuvent donc se permettre de l'utiliser.



U.S.I.S.

◀ Maquette d'un projet de station orbitale destinée à capter l'énergie solaire au-dessus de l'atmosphère de la Terre.



Bulloz

▶ La mine de Saint-Nicolas, la Fonderie, la Raffinerie, *gravures de H. Gross, école allemande du XVIe siècle.*

Ressources fossiles d'origine solaire

La première utilisation massive de matières énergétiques remonte à l'Antiquité avec le bois.

Le bois était utilisé pour l'exploitation des mines et pour la métallurgie. Les roches dures étaient abattues avec l'aide du feu : par suite de la dilatation différentielle des minéraux qui constituent les roches à haute température, celles-ci se désagrègent. L'arrosage de la roche chauffée provoque des contractions thermiques différentielles qui agissent dans le même sens.

Les besoins en bois du mineur et du métallurgiste ont contribué pour une part importante à la destruction des forêts, et ainsi à la disparition des communautés qui ont forgé leur prospérité sur les premières exploitations minières.

Si à cette époque on avait tenté d'évaluer les ressources énergétiques de la planète, on aurait vite conclu à un risque de pénurie certain à long terme, ou du moins empêchant toute croissance industrielle, car les forêts ne se reconstruisent pas assez rapidement.

Il a fallu attendre l'utilisation du charbon pour provoquer la révolution industrielle au XVIIIe siècle. Depuis les besoins d'énergie n'ont cessé d'augmenter. D'autres formes d'énergie, plus commodes, moins onéreuses, sont apparues, toujours pour permettre la croissance industrielle.

Les récents événements pétroliers ont conduit les pays industrialisés à adopter des mesures sévères d'économie d'énergie. La crainte de la pénurie est-elle justifiée? La réponse à la question : manquerons-nous d'énergie à long terme? est-elle la même si l'on se place au niveau mondial, à l'échelle d'un pays ou d'une région? L'opinion peut s'inquiéter, car les énergies fossiles sont épuisables. En disposerons-nous suffisamment pour permettre de développer des sources d'énergie renouvelables?

Nous allons essayer de répondre à ces questions en étudiant le problème des réserves d'énergie dans le monde, et d'analyser cette notion, car elle ne recouvre pas seulement un problème de quantités physiques.

Notions de gisement

Un **gisement** est une accumulation telle que son exploitation puisse être envisageable immédiatement ou dans un avenir pas trop éloigné. Cette définition est donc géologique et économique. On ne parlera que de « corps métallifères » lorsque l'on rencontrera une concentration en un élément supérieure à sa teneur moyenne dans l'écorce terrestre, mais que la rentabilité de son exploitation n'est pas prouvée.

Ainsi, une accumulation minérale considérée jadis comme pauvre peut devenir exploitable par suite de progrès technologiques concernant l'extraction, le traitement ou l'utilisation. Au contraire, une baisse des prix du marché peut compromettre fortement la rentabilité des mines.

Il y a donc, pour un gisement minéral, une *teneur exploitable inférieure limite;* celle-ci varie pour chaque gisement, en fonction de son environnement géographique, géologique et économique.

La présence de plusieurs minéraux exploitables dans un même minerai peut garantir la rentabilité. Les formations aurifères du Rand en Afrique du Sud renferment aussi de l'uranium à très basse teneur qui ne peut être exploité indépendamment de l'or. L'exploitation des gisements liés à des roches intrusives du Sud-Ouest africain, dont les teneurs sont aussi très basses, n'est possible que parce qu'elle a lieu à ciel ouvert.

L'exploitabilité d'une concentration métallifère dépend non seulement de sa teneur en métal, mais aussi de la quantité totale de métal qu'elle contient.

Gisements métallifères : exemple de l'uranium

La formation d'un gisement résulte de plusieurs phénomènes géologiques : plutonisme, volcanisme et sédimentation sont générateurs de corps minéralisés; altération météorique, érosion, métamorphisme, tectonique, circulation de l'eau font se déplacer et se concentrer par piégeage des minéralisations préalablement existantes, disséminées ou non. La formation d'un gisement d'uranium requiert la présence, par exemple, d'une préconcentration dans une roche ignée acide puis sa mobilisation

par l'eau qui, si les conditions sont favorables, conduit par piégeage à une concentration exploitable.

Dans la lithosphère, la teneur moyenne en uranium est de 3 à 4 parties par million (p. p. m.), mais l'éventail est très large selon les matériaux.

Les corps métallifères se rencontrent aussi bien dans les roches sédimentaires et métamorphiques que dans les roches volcaniques et plutoniques. On rencontre, dans les roches ignées acides, des teneurs en p. p. m. d'uranium assez élevées : 1 à 6 dans les granites et les syénites, 2 à 7 dans les rhyolites et les trachytes.

L'altération des sources primaires d'uranium a pour effet de le libérer sous forme hexavalente, stable en solution aqueuse. L'uranium a quatre valences possibles, les valences 4 et 6 étant les plus répandues. Après un déplacement plus ou moins grand, l'uranium est susceptible de se déposer avec certains sédiments ou de se fixer, sous des formes qui dépendent des conditions chimiques du milieu, dans tous les types de roches, y compris les formations sédimentaires non consolidées. Les teneurs en p. p. m. d'uranium sont de l'ordre de 1 à 13 dans les schistes, 1 à 80 dans les schistes carburés, 3 à 27 dans les bauxites, 1 à 350 dans les phosphates.

Ainsi, l'eau atmosphérique hydrothermale mobilisera l'uranium préconcentré dans la roche mère ignée acide ; il s'ensuit une dissémination qui peut conduire suivant le milieu récepteur à une surconcentration et, dans les cas favorables, à des gisements.

Les schistes bitumineux et les couches phosphatées correspondant à des conditions de dépôt en eau peu profonde représentent des volumes importants préconcentrés, sous forme de chalcolite.

En milieu continental, on observe une concentration dans des paléochenaux. L'uranium y a précipité, sous forme de *pechblende*, de *coffinite*, dans les zones réductrices et acides, riches en matières organiques par exemple (Colorado). On rencontrera de l'*uraninite* détritique dans les *placers* (or et uranium du Witwatersand), où l'accumulation est en grande partie mécanique, les minéraux les plus lourds étant piégés par un obstacle au ruissellement des eaux. Ces phénomènes peuvent se répéter au gré des crues, oxydation et reprécipitation provoquant un enrichissement.

L'eau, quelle que soit son origine (hydrothermale ou atmosphérique), emprunte préférentiellement les fractures de l'écorce terrestre. C'est pourquoi nombre de gisements d'uranium sont filoniens (Massif central, Vendée). Il est très difficile de déterminer si l'origine des accumulations est magmatique ou pas, d'autant qu'elles peuvent être remaniées et déplacées par des circulations postérieures. La nature des roches encaissantes pourra être favorable au dépôt.

Outre les *études géologiques* classiques communes à la prospection de tous les métaux : pétrographie, stratigraphie, sédimentologie, paléogéographie et étude structurale, la prospection de l'uranium est facilitée par des *méthodes géophysiques* propres : la radiométrie qui consiste à déceler le rayonnement émis par les descendants de l'uranium, l'émanométrie, mesure du rayonnement du radon. La prospection géochimique, grâce à l'étude des teneurs des eaux des sols et alluvions, permet de circonscrire les zones d'intérêt.



C. Raimond - Dityvon - Viva

▲ ***Exploitation du gisement d'uranium de Margnac (Haute-Vienne).***

Gisements de matières énergétiques fossiles

Ce schéma de la formation des gisements métallifères, d'une part, par dissémination de masses diffuses mais importantes, et d'autre part par concentrations locales successives pouvant conduire à des teneurs exploitables, peut se transposer dans ses grandes lignes aux gisements de matières énergétiques fossiles.

Pour le physicien, l'énergie est quelque chose qui se transforme ; son utilisation est une transformation comportant une perte qualitative mais quantitativement équivalente. Dans l'écorce terrestre, l'énergie s'est transformée et concentrée sous forme chimique, plus ou moins selon les conditions de gisement.

L'énergie libérée par une matière combustible se mesure par son *pouvoir calorifique* en calories par kg, mais la qualité, donc la valeur de cette énergie, dépend de la température T à laquelle ces calories sont libérées, c'est-à-dire du travail que pourrait fournir une machine de Carnot entre la température T et la température ambiante.

Dans la croûte terrestre, on rencontre des matières combustibles ayant des pouvoirs calorifiques et des températures de combustion plus ou moins élevées, ainsi l'énergie y est-elle plus ou moins concentrée.

Ces matières sont toutes d'origine organique. Il y a donc une première concentration de l'énergie solaire par photosynthèse dans la matière organique. Pour former un gisement, ou plutôt une roche mère, il faut une accumulation locale de matière organique, par exemple le dépôt dans un milieu lagunaire ou dans des marécages acides (tourbières). Cette matière organique va subir une première décomposition sous l'influence de Bactéries anaérobies. Il y a donc là accumulation de matière énergétique à un niveau calorifique peu élevé.

Le niveau d'énergie de ce dépôt va augmenter dans la suite de l'évolution sédimentaire et orogénique de bassin. Lors de son enfouissement, cette matière va subir des transformations sous l'influence de l'augmentation de la pression et de la température en profondeur. Il y a là un deuxième appport énergétique mécanique et ther-

mique dont l'origine est profonde et résulte probablement des réactions radio-actives au sein de la croûte et du manteau.

Suivant les roches mères et les conditions initiales de dépôt, on assistera, sous l'influence de ce deuxième apport énergétique, à une transformation plus ou moins grande conduisant soit à des lignites et des charbons, soit à des hydrocarbures par craquage des macromolécules organiques en molécules plus simples. Dans ce deuxième cas, il n'y a pas concentration énergétique au sein même de la roche mais dissémination sous forme gazeuse ou liquide. Cette mobilisation peut là encore conduire par piégeage à la formation de gisements exploitables qui représentent une accumulation de matière suffisante d'un niveau d'énergie calorifique potentielle élevé.

On peut distinguer dans l'ensemble des roches combustibles, dérivant d'anciens êtres vivants, animaux ou végétaux :

— Les combustibles formés à partir d'organismes inférieurs, surtout aquatiques (plancton), dont la matière organique a une forte teneur en graisse et en protéines; ces combustibles ont subi la bitumisation : les *pétroles* et les *schistes bitumineux* en dérivent.

— Les charbons humiques, constitués essentiellement par des végétaux terrestres supérieurs, à forte teneur en hydrates de carbone, qui correspondent approximativement aux *charbons*, *lignites*, et *tourbes*. Il existe évidemment des termes de passage comme les *cannel-coals*, formés de spores et donnant 40 à 60 % de matière volatile, et les *bogheads* formés d'Algues, donnant 65 à 66 % de matière volatile.

Les gisements d'hydrocarbures

D'origine sédimentaire, les gisements d'hydrocarbures se rencontrent dans les bassins sédimentaires. Étant donné que ces hydrocarbures sont liquides ou gazeux, les gisements se rencontrent dans des roches poreuses et perméables dites *roches réservoirs*. Pour qu'il y ait accumulation, il faut un obstacle à l'écoulement de ces fluides.

Ce n'est que dans les structures susceptibles de piéger l'huile ou le gaz en quantité notable que l'on trouvera des gisements commercialisables. Ces *pièges* qui seront prospectés de façon systématique dans les bassins pétrolifères peuvent être de divers types.

— Le plus connu est sans doute l'*anticlinal* surmonté d'une couverture imperméable; là, les hydrocarbures sont bloqués dans leur circulation par la voûte formée par la couverture empêchant tout mouvement ascendant.

— Un autre type est celui du *monoclinal faillé;* les failles sont souvent remplies par des matériaux imperméables, ou elles peuvent, par suite du jeu de faille, mettre côte à côte deux couches de nature différente. Si, dans une série stratigraphique ayant un pendage uniforme, une couche imperméable surmonte une roche perméable, il y a un chemin préférentiel pour les liquides. Tout obstacle à l'écoulement, comme celui susceptible de se produire par le jeu d'une faille, provoquera une fermeture, et ainsi on aura là une structure piège favorable.

— D'autres pièges sont liés à la tectonique des *dômes de sel*. Là les dômes de sel imperméables forment la fermeture. En effet, les dépôts de sel, sous l'influence des contraintes mécaniques résultant de l'enfouissement



Areofilm Ltd

▶ *Vue aérienne d'un anticlinal; là, les hydrocarbures sont bloqués dans leur circulation par la voûte formée par la couverture imperméable.*


S.E.F.

◀ *Un affleurement de pétrole en Irak.*

et de mouvements tectoniques postérieurs à la mise en place de la série sédimentaire, subissent des déformations plastiques. Il s'ensuit des déformations pouvant provoquer dans les zones de moindre résistance l'intrusion de dômes de sel discordants par rapport à la série sédimentaire, et donc la possibilité de structure d'accumulation.

— D'autres pièges enfin peuvent être liés aux particularités stratigraphiques de la série : *lentilles de sable, biseau stratigraphique, paléorécifs,* etc.

Les gisements de gaz naturel

Le gaz naturel peut être défini comme la fraction des hydrocarbures extraite du sol qui est à l'état gazeux dans les conditions normales. Ce même gaz peut exister sous plusieurs formes selon les conditions de gisement.

— Le gaz peut être associé au pétrole. Dans les gisements où l'huile est sous-saturée, le gaz est entièrement dissous dans la phase liquide. La différenciation progressive des deux phases ne se fait que lors de la montée dans les tubes de production ou plus tard dans les séparateurs. Tant que la pression interne du gisement reste supérieure à la pression de saturation, le gaz produit a une composition constante. Quand la pression est inférieure à la pression de saturation, l'huile est surmontée par un chapeau de gaz, le gaz libre. Au cours de la production, lorsque la pression baisse dans le réservoir, la solubilité des gaz plus légers diminue plus vite que celle des homologues supérieurs ; en conséquence, la composition du gaz récupéré varie. Il s'enrichit relativement en produit plus lourd.

— Le gaz naturel peut être totalement libre dans les conditions de gisement, même si dans certains cas les produits liquides apparaissent par condensation rétrograde au moment de la production. C'est le gaz non associé. Si le gaz donne lieu à condensation, on parle de *gaz riche* ou de *gaz humide*.

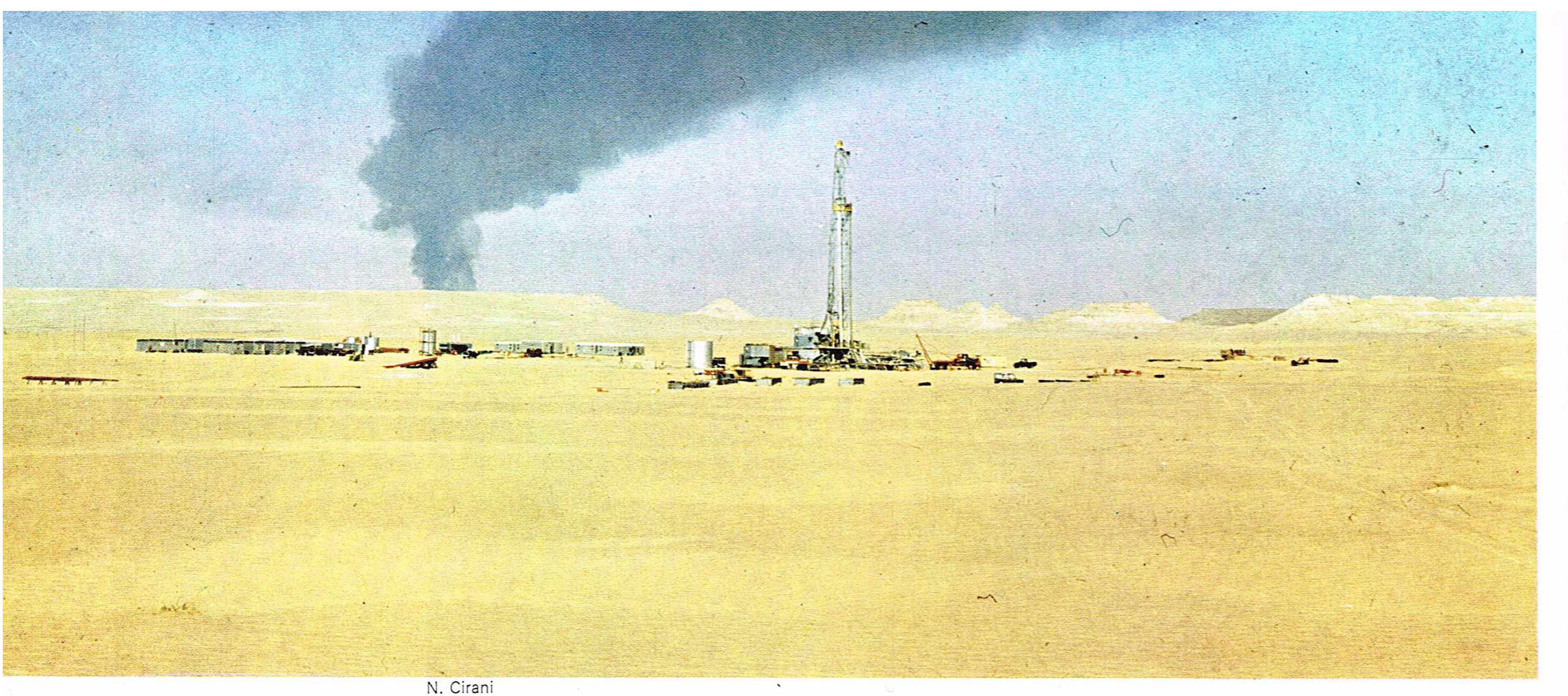
Les molécules d'hydrocarbures, qui composent les gaz naturels, sont plus légères que celles du pétrole. Le gaz devrait, dans une même série géologique, surmonter l'huile ; la probabilité relative de trouver du gaz diminuerait avec la profondeur. Cependant, si l'on considère que le gaz provient de matières organiques ayant subi une évolution plus longue et qui ainsi ont vu diminuer la masse moléculaire moyenne des hydrocarbures qui les composent, la probabilité relative de trouver du gaz augmente avec l'ancienneté des terrains et surtout avec la profondeur. C'est ce dernier critère qui l'emporte en général.

Les méthodes de prospection sont donc comparables à celles du pétrole. Une seule différence est notable : la perméabilité des terrains, qui est plus forte au gaz qu'à l'huile. Pour qu'il y ait gisement de gaz, il faut que la couverture soit particulièrement étanche. On met à profit dans la prospection géochimique la grande mobilité du gaz en dosant le gaz contenu dans les prélèvements systématiques d'échantillons de sol. Les cartes d'isoteneur obtenues par ce procédé fournissent alors, parfois, à la surface, une photographie du gisement ou des grands accidents qui l'affectent.

Prospection des hydrocarbures

La prospection de ces pièges nécessite, tout comme la prospection des gisements métallifères, une connaissance approfondie du bassin sédimentaire. Ceci suppose que des études sédimentologiques, stratigraphiques, paléogéographiques et structurales, etc., soient entreprises.

La géophysique apporte des compléments précieux aux études géologiques. La *magnétométrie,* c'est-à-dire la mesure de la susceptibilité magnétique des roches, renseigne quant à la structure profonde du bassin. Les prospecteurs utilisent l'*aéromagnétisme,* c'est-à-dire la



N. Cirani

▲ *Les forages d'exploitation, ici pour la recherche de pétrole dans le désert de Libye, apportent des renseignements géologiques complémentaires par l'étude des déblais, par les carottages et les mesures physiques effectuées dans les sondages.*

prospection aéroportée à partir d'avions équipés d'appareils de mesure permettant un quadrillage rapide et complet de la zone de recherche.

La *gravimétrie*, qui mesure la valeur de l'accélération de la pesanteur, renseigne sur la densité des roches et donc sur la structure en profondeur du bassin.

Mais la méthode la plus utilisée est la *sismique*. On provoque dans le sol un ébranlement qui se propage avec des vitesses différentes selon la nature des couches traversées. Ainsi, on observera, comme en optique, des phénomènes de réflexion et de réfraction. Les ébranlements réfléchis à l'interface, entre deux couches, sont captés par des géophones, puis analysés et traités, pour obtenir finalement une visualisation d'une coupe en profondeur le long du profil de tir. Cette méthode, très précieuse, est très employée. Elle représente 98 % des dépenses de géophysique engagées par les compagnies pétrolières. Notons qu'en mer c'est la seule qui soit à notre disposition alors que la géologie de terrain est impossible.

Toutes ces études débouchent sur une campagne de *forages d'exploration* au droit des structures jugées les plus intéressantes. Les forages d'exploration apportent des renseignements géologiques complémentaires par l'étude des déblais, par les carottages et les mesures physiques effectuées dans les sondages (diagraphies électriques, gammagraphies, etc.) ; il en résulte la connaissance soit de puits secs, soit de puits productifs.

Ce n'est pas parce qu'un puits est productif ou présente des indices de pétrole ou de gaz que l'on a pour autant découvert un gisement. D'autres forages doivent être entrepris pour délimiter l'extension et déterminer les conditions de gisement avant de prendre la décision de développer ce gisement.

C'est à ce niveau qu'il faut estimer la rentabilité potentielle du gisement qui permettra d'entreprendre les investissements en forage, l'installation de surface et d'évacuation de la production. Ces investissements varient d'un gisement à l'autre, suivant les caractéristiques physiques et économiques du champ pétrolier.

Dans des conditions difficiles ou pour des champs situés loin des centres de consommation, seuls les gros gisements permettront de financer les installations d'évacuation. Malheureusement, dans un bassin sédimentaire, il y a beaucoup plus de petits champs que de grands.

La découverte de champs importants dans une zone permettra le développement de champs de moindre taille au voisinage, car ceux-ci pouront être raccordés aux pipe-lines installés pour évacuer la production de grands champs.

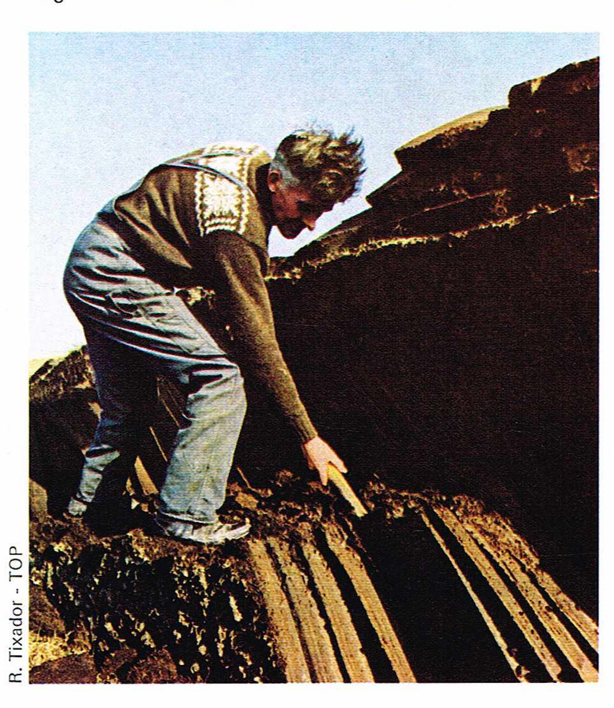
Des champs de petite taille pourront aussi être développés s'ils sont situés dans les zones de consommation. Si, par contre, on se trouve loin du marché et dans des conditions difficiles, il faudra mettre en évidence des gisements plus importants. L'intérêt potentiel de ces zones est donc *a priori* moindre, car les gisements de grande taille sont plus rares, mais l'espoir de découverte d'un énorme champ subsiste toujours, bien que la probabilité de découverte soit plus faible.

La tourbe

Une tourbière n'est pas un simple marécage. La formation de tourbe nécessite deux bilans excédentaires : celui de la matière organique dont la production doit l'emporter sur la décomposition, et celui de l'eau, car le sol, malgré l'évapotranspiration, doit rester engorgé. L'eau est le facteur essentiel ; elle permet le développement des plantes hydrophiles. Sa stagnation rend le milieu asphyxiant. La base des plantes s'enfonce sans se décomposer, par suite de la pauvreté de plus en plus grande de l'eau en oxygène. La tourbe, milieu réducteur, fossilise parfaitement toutes les structures organiques qui y sont emprisonnées. Les débris de plantes mortes sont normalement détruits à l'air, mais noircissent sous l'eau, par l'action de micro-organismes.

Après une diagenèse modérée, biochimique et mécanique, il se forme une roche combustible renfermant entre 50 et 58 % de carbone : la tourbe. La tourbe a joué, jadis, un grand rôle économique : combustible médiocre mais abondant et bon marché, litière pour le bétail, amendement organique et même matériau de construction isolant.

Les méthodes anciennes d'exploitation artisanale respectaient le milieu en le rajeunissant. Nombre de fosses d'exploitation constituent des étangs ou des mares. Le mode d'exploitation actuelle s'accompagne d'un drainage, destructeur du milieu, dont l'utilisation ultérieure pour l'agriculture est souvent vouée à l'échec.



R. Tixador - TOP

▶ *Un gisement de tourbe.*



Cedri - Beaujard

▲ Mine de charbon dans la région de Lens (France).

Le charbon et le lignite

Il existe de nombreuses variétés de charbons, car les éléments végétaux qui les ont constitués étaient eux-mêmes variés. Ces éléments ont subi la *carbonification* qui se traduit d'un point de vue physico-chimique par un enrichissement relatif en carbone ; en même temps, il y a diminution des matières volatiles, diminution de l'hydrogène et de l'oxygène, et augmentation, jusqu'à un certain stade, du pouvoir calorifique.

Les pouvoirs calorifiques s'échelonnent de 8 550 kcal/kg (charbons bitumineux) à moins de 3 500 kcal/kg (lignite), et même beaucoup moins pour la tourbe dont nous ne tiendrons pas compte dans les statistiques.

Au XIXe siècle, le charbon représentait l'unique combustible industriel connu. On comprend donc que ce soit celui dont on connaisse le mieux les réserves. Mais il subsiste des incertitudes quant aux réserves économiquement récupérables. La géologie du charbon est relativement simple et uniforme sur de vastes régions. C'est donc pour ce combustible que semble atteint le meilleur consensus quant aux évaluations des réserves, et les réévaluations sont plus rares et de moindre importance que pour les hydrocarbures liquides et gazeux.

Localisation des réserves

Les réserves mondiales totales effectivement récupérables dans les conditions économiques actuelles sont estimées à 700 milliards de tonnes, les réserves ultimes, c'est-à-dire les accumulations que l'on pense géologiquement pouvoir exister, à 10 800 milliards de tonnes ; les réserves prouvées représentent 1 300 milliards de tonnes. L'essentiel des réserves se trouve situé dans des pays économiquement développés (*tabl.* I).

Les réserves de combustible solide sont donc considérables. Exprimées en années de consommation actuelle, elles représentent 200 années pour les réserves récupérables, 475 pour les réserves prouvées et 3 500 pour les estimations des réserves ultimes ! Ces ratios réserves/production courante sont analogues pour les meilleures qualités (anthracites) : 198-494 années et les plus basses qualités (lignite et houille brune) : 194-415 années.

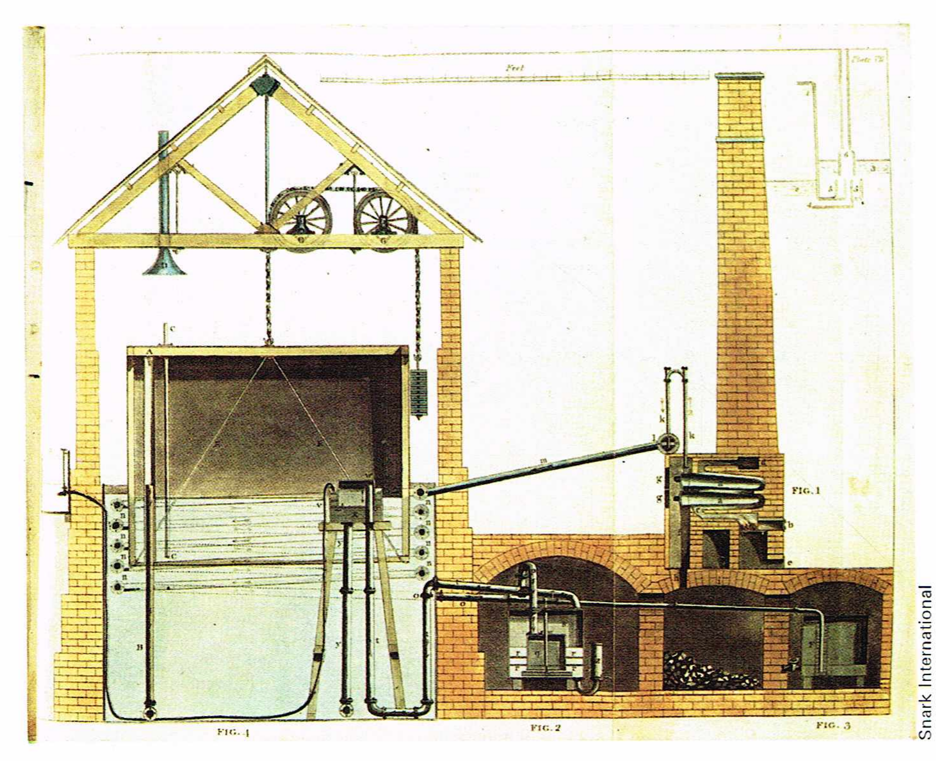
Tableau I
Estimation des réserves de charbon (World Coal, Novembre 1975)

Pays	Réserves économiquement récupérables (en milliards de tonnes) aux conditions de 1973	Réserves prouvées en milliards de tonnes
Amérique du Nord	188	379
Europe	79	301
Chine	101,3	200
Monde	700	1 300

◀ Tableau I : estimation des réserves mondiales de charbon faite en 1975.

Les combustibles solides constituent la seule source d'énergie fossile pour laquelle on dispose de ratios aussi élevés. Au cours des dix dernières années, on a constaté des évolutions très différentes entre les États-Unis et l'U. R. S. S. d'une part, et l'Europe et le Japon d'autre part. Ces deux derniers ont conduit des politiques de régression charbonnière. Les États-Unis et les pays de l'Est ont, au contraire, continué à développer leurs charbonnages. Le taux de croissance pour la période 1961-1972 est de 3,3 % aux États-Unis et 5,2 % en Europe orientale. La production mondiale est stabilisée depuis 1970 au niveau de 2 400 millions de TEC.

En fait, aux États-Unis et en U. R. S. S., on constate un développement encore plus rapide en volume. En effet, on exploite de plus en plus des combustibles fossiles à faible pouvoir calorifique, et ce, en raison des gains de productivité permis par la mécanisation et l'exploitation à ciel ouvert (55 % de la production américaine se fait en carrières).



Snark International

▲ *Gravure du XIXe siècle (1819) expliquant un procédé de fabrication de gaz à partir du charbon.*

Utilisation du charbon

Aux XVIIIe et XIXe siècles, le charbon était utilisé directement pour le transport (chemins de fer et bateaux à vapeur), indirectement pour la production de coke, servant à la fabrication de la fonte, et également à la fabrication de gaz de ville distribué aux foyers domestiques et à l'industrie.

Si, de nos jours, les deux premières utilisations sont en voie de disparition, la fabrication de gaz à partir de charbon pourrait, sous une autre forme, revenir à l'ordre du jour. Le déficit de gaz naturel des États-Unis pourrait être en partie comblé par la production d'un gaz riche de synthèse, contrairement au gaz pauvre, appelé aussi gaz à l'eau, dont la production a pratiquement disparu, même en Angleterre et en Allemagne.

En effet, les coûts de transport élevés condamnent à utiliser le charbon près des mines ou des ports d'importation. Gaz et pétrole de synthèse représentent la forme la moins onéreuse de véhiculer l'énergie. Actuellement, ces procédés deviennent concurrentiels grâce aux prix élevés du pétrole brut.

La production de coke n'a pas trop souffert de la concurrence pétrolière et gazière ; il n'y a pas là possibilité de substitution totale bien que l'on puisse utiliser du fuel-oil pour compléter la « mise au mille ». La production mondiale de coke est de l'ordre de 350 millions de tonnes obtenues par traitement d'environ 465 millions de tonnes de charbons bitumineux volatil et très volatil.

Les industries lourdes, sidérurgie, cimenterie, grosses consommatrices d'énergie, restent un débouché important pour le charbon. La production d'électricité thermique est un autre gros consommateur, particulièrement aux États-Unis. Là encore, on réalise une transformation permettant un transport et une utilisation beaucoup plus souples. On consomme donc le charbon de façon *ponctuelle* et *massive*. Cependant, le charbon ne pourra pratiquement pas concurrencer l'énergie nucléaire pour la production d'électricité.

Le charbon possède un coût marginal de production très supérieur à celui des énergies concurrentes ; les frais de main-d'œuvre sont très importants et les coûts de transport très élevés. Cependant, l'énormité de ces réserves et leur situation géographique dans des pays industriellement développés (elles sont donc utilisables sur place) sont des atouts importants. De plus, il s'agit d'une source de matière première pour la carbochimie, et l'on peut espérer pallier le goulot d'étranglement du transport par la gazéification.

Les délais de mise en production du charbon et du lignite sont tout à fait comparables à ceux des autres énergies (5 à 10 ans) et même, dans les cas favorables d'exploitation en carrière, inférieurs (18 mois) aux délais du nucléaire (7 ans) et du pétrole (5 ans et plus).

Le charbon est donc « l'énergie marginale » par excellence. On dispose de centaines d'années de production courante en réserves économiquement exploitables. On peut penser qu'il serait possible d'augmenter les productions à des rythmes moyens de 5 à 7 % sans rencontrer de difficultés, comme l'histoire l'a déjà prouvé.

Les goulots d'étranglement et les freins à la croissance se trouvent au niveau de la demande. Seules les techniques de gazéification et de liquéfaction du charbon permettront la croissance de l'industrie charbonnière.

▼ *Exploitation d'un gisement de lignite à Arjuzanx (Landes).*

Lang - Rapho

Procédés de gazéification et liquéfaction

Gazéification

Les procédés, actuellement à l'étude aux États-Unis, en vue de la fabrication d'un gaz à haut pouvoir calorifique, sont les procédés Lurgi et Hygas.

• *Procédé Lurgi*

Au cours des 30 dernières années, on a construit 16 installations selon le procédé allemand Lurgi, qui a été récemment amélioré.

Le charbon, en lit fluidisé, est gazéifié à contre-courant, sous pression de vapeur et d'oxygène. Il s'agit de houille qui n'est pas susceptible d'être agglutinée. Les cendres sont évacuées par le fond du réacteur.

Le gaz brut, soutiré en tête, est lavé à l'huile pour éliminer le goudron, les huiles lourdes et les particules solides. Ce gaz est ensuite purifié et sa composition est ajustée, puis il est converti en méthane qui sera à nouveau purifié et déshydraté.

Les sous-produits sont : des goudrons, des fuels lourds, du naphta, de l'ammoniac, des phénols et du soufre. Ceux-ci contribuent à la rentabilité de l'opération.

• *Procédé Hygas*

Le procédé Hygas est développé par l'Institute of Gas Technology. Les essais des unités pilotes ont montré que ce procédé était techniquement réalisable, et il semblerait que sa rentabilité puisse être assurée.

Le charbon est gazéifié dans deux réacteurs en série à lit fluidisé, le premier à basse température, le second à température élevée. Les cendres résiduelles sont utilisées pour produire l'hydrogène injecté dans les réacteurs.

Le gaz est ensuite lavé à l'huile, purifié, ajusté, méthanisé et déshydraté.

Les sous-produits sont : du benzène, du fuel lourd, de l'ammoniac, du soufre et du dioxyde de soufre.

Le pouvoir calorifique du gaz est légèrement supérieur à celui du gaz obtenu par le procédé Lurgi. Cependant, ce procédé utilise des charbons dont la teneur en soufre est moins importante.

Liquéfaction

Les procédés de liquéfaction transforment le charbon en hydrocarbures liquides.

• *Procédé Consol synthetic fuel*

Le procédé Consol synthetic fuel produit du naphta et du fuel lourd. Les liquides sont extraits par un solvant qui permet également d'apporter de l'hydrogène aux produits d'extraction. L'hydrogène est obtenu à partir des cendres et sert à l'hydrotraitement du naphta.

Le naphta et le fuel lourd produits ont des teneurs en soufre faibles, permettant leur commercialisation. Le naphta produit peut ensuite être traité dans une unité de reformage, afin de fabriquer un carburant automobile à haut indice d'octane.

• *Procédé Koppers-Totzek*

Une autre solution consiste à produire du méthanol, il s'agit du procédé Koppers-Totzek.

Transport par carboduc

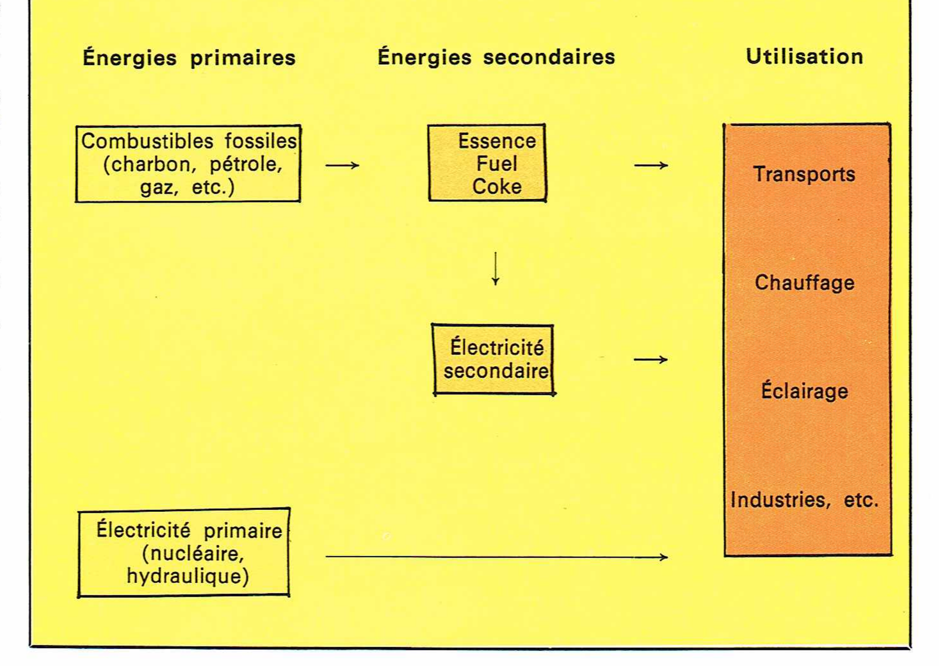
Pour supprimer le goulot d'étranglement du transport du charbon, on peut également utiliser la technique du carboduc. Le charbon finement broyé, en suspension dans l'eau, peut ainsi être transporté dans des conditions intéressantes vers les centres de consommation massive. Aux États-Unis, 17 carboducs importants sont en service. Le plus gros transporte annuellement 4,5 millions de tonnes sur une distance de 435 km.

En U. R. S. S., un projet est à l'étude pour la construction d'un carboduc sur une distance de 400 km. L'amélioration du transport se traduit par une économie de 12 %; pour l'ensemble des éléments de production de charbon et de production d'électricité, l'économie serait de 15 %. Par ailleurs, les carboducs n'altèrent en rien l'environnement et le mélange de charbon broyé dans l'eau donne une fumée plus propre. On envisage de construire des carboducs en matière plastique, ce qui devrait réduire les investissements nécessaires.

Il nous semble donc qu'au moins dans certains pays producteurs et gros consommateurs d'énergie comme les États-Unis et l'U. R. S. S., le charbon a encore devant lui un bel avenir.

Énergies primaires et secondaires

Les 5 sources principales d'énergie dite primaire (95 % de l'énergie consommée) sont : le charbon, le pétrole, le gaz, l'énergie hydraulique et l'énergie nucléaire, les deux dernières étant en quasi-totalité produites sous forme d'électricité.
On rangera l'électricité dans les énergies primaires quand elle est fournie par des installations hydrauliques ou nucléaires, dans les énergies secondaires lorsqu'elle est produite par des centrales à charbon ou à fuel. La distinction entre énergie primaire et énergie secondaire permet ainsi de ne pas comptabiliser deux fois certaines formes d'énergie dans le bilan énergétique d'un pays : l'électricité (secondaire) et le pétrole (primaire) qui a servi à la fabriquer par exemple. On peut donc représenter schématiquement dans le diagramme suivant les principaux cycles de transformation et d'utilisation de l'énergie.



▲ ***Principaux cycles de transformation et d'utilisation de l'énergie.***

T.-E.P. : tonne équivalent pétrole
T.-E.C. : tonne équivalent charbon
1 bbl = 1 barrel = 1 baril = 159 l

Coefficients d'équivalence usuels :

1 T.E.P. = 1,5 T.E.C. = 4,5 MWh

Pour le gaz : 1 000 thermies P.C.S. = 0,1 T.E.P.
(P.C.S. signifie : pouvoir combustible supérieur)

Ordre de grandeur : une centrale nucléaire de 1 000 MW fonctionnant 80 % du temps, marche 6 200 h dans une année et produit donc 1 000 × 6 200 = 6 200 000 MWh soit 6,2 TWh (térawatt/heure), ce qui équivaut à : 14 000 000 T.E.P.

◀ ***Quelques symboles, unités et abréviations utilisés dans le texte.***


Delcourt - Rapho

La carbonisation

En 1874, Caron, en Écosse, découvrait que la houille pouvait être cokéfiée et constatait que le coke pouvait remplacer le charbon de bois dans les hauts fourneaux. Les sous-produits étaient brûlés. Ce n'est qu'en 1881, en Allemagne, que les premières cokeries à récupération furent installées. De nos jours, la distillation de la houille s'effectue à haute température (1 200 °C).

A partir d'une houille grasse, comportant 20 à 30 % de matières volatiles, on obtient par tonne de charbon : 700 à 800 kg de coke, 25 à 40 kg de goudron, 7 à 12 kg de benzol, 1,4 à 2,6 kg d'ammoniac donnant 6 à 10 kg de sulfate d'ammonium, 300 à 350 m^3 de gaz. Le chauffage des batteries de fours utilise environ 45 % du gaz distillé.

Le **coke** est destiné à la sidérurgie. Il sert également à fabriquer du *carbure de calcium*. Ce produit servant à produire l'acétylène et ses dérivés a joué un grand rôle dans le développement de l'industrie chimique. Il faut souligner que l'industrie du carbure de calcium permet aussi la production d'un engrais, la *cyanamide calcique*, après une réaction dite d'azotation, à partir de coke, de chaux et d'azote dans un four électrique.

Les **goudrons** sont distillés, soit pour la production de goudron routier, soit pour la production de brais et d'huile brute.

Les *brais* sont utilisés pour l'agglomération des charbons maigres, pour les enduits, peintures et vernis de protection.

Les *huiles brutes* sont fractionnées en diverses coupes dont on tire des produits de base pour l'industrie chimique, comme les *phénols*, employés pour préparer des produits pharmaceutiques, explosifs, matières colorantes et surtout résines et textiles synthétiques. On obtient également du *naphtalène* à partir duquel on fabrique les polyesters et les résines glycérophtaliques; la production insuffisante laisse la place à l'orthoxylène pétrolier pour la fabrication de l'anhydride phtalique.

Après élimination des goudrons on sépare du gaz de four les **benzols** par lavage aux solvants, à partir desquels on obtient le *benzène* dont la chimie est très développée (ce développement n'a été possible qu'à partir du benzène pétrolier). La plupart des dérivés du benzène servent à la fabrication des matières plastiques et textiles synthétiques.

Les gaz de four, depuis les travaux de Georges Claude, servent à la fabrication de l'**ammoniac.**

Exploitation du charbon

Exploitation à ciel ouvert

Les charbons bitumineux et les lignites allemands sont exploités à ciel ouvert. Les gisements ont conduit au développement de méthodes et de machines originales.

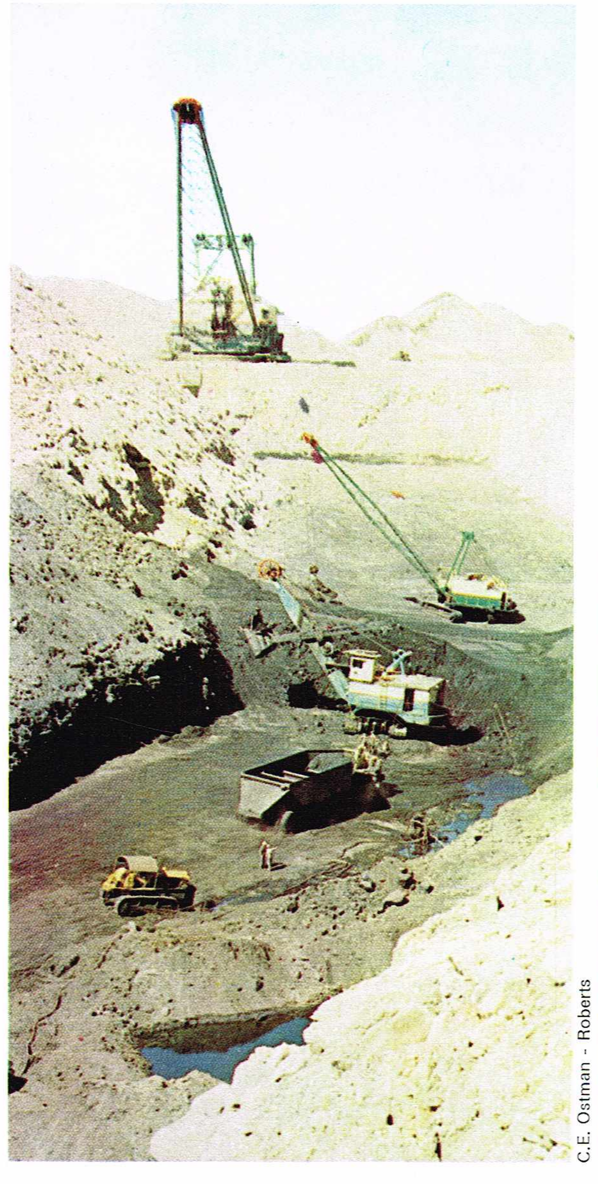
En général, une exploitation à ciel ouvert apparaît comme une gigantesque cuvette dont les bords sont découpés en gradins, certains dans le minerais, d'autres dans le stérile.

Le rapport du tonnage de matériaux stériles au tonnage de minerai est un facteur économique important. Ce rapport peut augmenter avec la valeur marchande du minerai, sans pouvoir dépasser la limite qui conduirait à un prix de revient plus élevé en découverte qu'en exploitation souterraine. Dans les exploitations américaines de charbon bitumineux, il est en moyenne de 20.

Un bilan économique à chaque profondeur permet de déterminer jusqu'où doit se poursuivre l'exploitation à ciel ouvert avant de céder la place à l'exploitation souterraine.

Dans la plupart des cas, le recours à l'explosif est nécessaire pour abattre les roches et pour débiter les blocs. Le tir d'abattage utilise des trous de mines sensiblement parallèles au front des gradins, lequel est presque toujours vertical. L'explosif travaille ainsi à proximité d'une surface de dégagement sur laquelle l'onde explosive se réfléchit, soumettant la roche à des contraintes de traction à laquelle elle résiste mal; la charge est plus concentrée à la partie inférieure, ainsi la partie supérieure s'effondre sous son propre poids.

Les gisements de charbon bitumineux américains sont en général constitués par des couches horizontales. L'exploitation en découverte progresse par tranchées parallèles; dans la tranchée en activité, le charbon est abattu à l'arrière, tandis qu'à l'avant des pelles ou des



C.E. Ostman - Roberts



Montecatini - Edison

▲ *A gauche, une exploitation à ciel ouvert apparaît comme une gigantesque cuvette dont les bords sont découpés en gradins; ici, une mine de charbon à ciel ouvert dans le Queensland (Australie). A droite, usine de séparation des benzols à partir desquels on obtient le benzène.*

draglines géantes enlèvent les roches qui le recouvrent et les déposent directement à l'emplacement de la tranchée précédente.

Pour travailler en fouille, c'est-à-dire à l'enlèvement des terres à une cote inférieure à celle du plan qui supporte la machine, on utilise de préférence des draglines.

La puissance des machines s'apprécie par la capacité de leur godet et par la distance à laquelle elles déversent les déblais. Les plus grosses draglines ont des godets de 55 et même 65 m^3, et les flèches atteignent respectivement 83 et 75 m; la plus grande atteint 95 m avec un godet de 160 m^3. La plus grosse pelle adaptée à un recouvrement de 30 m porte un godet de 135 m^3, qui déverse son chargement à 60 m; sa masse totale dépasse 12 000 tonnes.

Les gisements de lignite allemands comportent des couches très puissantes, très irrégulières, mais à profondeur modérée dans des terrains dont la tenue serait peu favorable à l'exploitation souterraine. Ils sont exploités en découverte depuis la Première Guerre mondiale. L'outil d'abattage est une roue à godets, parfois une chaîne de godets.

Les matériaux abattus sont déversés sur des convoyeurs en série; le lignite est chargé en train ou envoyé directement dans le parc d'une centrale. Le stérile est déversé par une épandeuse à convoyeur en dehors de la zone qui reste encore à exploiter.

L'ensemble de l'installation permet donc un travail en continu, et non plus cyclique comme c'est le cas des installations à pelles.

Comme pour les charbons bitumineux américains, l'échelle du matériel n'a cessé de grandir pour arriver à traiter des découvertes de 250 m de profondeur par gradins de 50 m de haut. La plus grosse machine en service en Allemagne, qui est mobile grâce à trois trains de quatre chenilles, est équipée d'une roue de 16 m de diamètre, portant 10 godets de 4 m^3, sa masse est de 7 350 tonnes et la puissance installée dépasse 9 000 kW. La machine débite plus de 10 000 m^3/h.

Pour servir ces énormes machines, on a construit des wagons de près de 100 m^3 de capacité et également des convoyeurs équipés d'une courroie de 2,60 m de large qui se déplace à 5 m/s.

Exploitation souterraine

Une mine comporte au moins deux puits verticaux d'accès au minerai. Un puits assure normalement une partie ou la totalité des fonctions suivantes : aérage, circulation du personnel, extraction des produits, transport du matériel et des fournitures, descente des remblais et l'exhaure (évacuation de l'eau). Les travaux miniers se développent dans les trois dimensions de l'espace.

Les plus beaux gisements souterrains de charbon dans le monde sont les plus réguliers, les moins affectés par les mouvements orogéniques. Ils sont formés de couches épaisses de 1,5 à 3 m, et de pendage modéré; ils sont exploités par piliers abandonnés, à faible profondeur, ou par longue taille.

Des *piliers abandonnés* supportent le poids des terrains susjacents. Ces piliers protègent pendant la phase de dépilage contre l'éboulement du toit.

◀ *Page ci-contre, une cokerie dans la région de Douai (France); destiné à la sidérurgie, le coke sert également à la fabrication du carbure de calcium.*

La technique de la *longue taille* est spécifique des charbonnages. Elle se développe à partir de deux galeries dans la couche, la voie de tête et la voie de base, distantes de 100 à 300 mètres.

Le chantier lui-même comporte deux ou trois allées de travail qui réunissent voie de tête et voie de base. Ces allées sont maintenues ouvertes par un soutènement, entre les vieux travaux et le front de taille. Elles servent à la circulation du personnel et des machines, et à l'alimentation du chantier en énergie. Elles contiennent les engins d'évacuation du charbon, en général des convoyeurs à chaînes.

Du côté « front », l'abattage enlève à chaque cycle une tranche de charbon correspondant au volume d'une nouvelle allée. Du côté « vieux travaux », le soutènement est récupéré pour être reposé au fur et à mesure de l'avancement, d'où en général foudroyage. On provoque un éboulement contrôlé dans le vide laissé par le minerai enlevé. Dans certains cas, les « vieux travaux » sont remblayés.

Pour abaisser le prix de revient, les chantiers sont mécanisés intégralement : abattage, soutènement et chargement.

L'abattage est effectué par une *haveuse* qui se déplace le long du front, parallèlement au convoyeur blindé. Des piles hydrauliques constituées par deux vérins portant un large chapeau maintiennent le toit au-dessus des allées de travail. En arrière, les terrains non soutenus sont foudroyés. Un vérin hydraulique porté par la pile, dit vérin de ripage, pousse le convoyeur vers le nouveau front. Lorsque le ripage du convoyeur est terminé, la pile est desserrée et tirée par le vérin à proximité du convoyeur, puis resserrée.

Aux conditions de travail difficiles s'ajoutent les dangers provenant du grisou, de la poussière, des incendies et des feux.

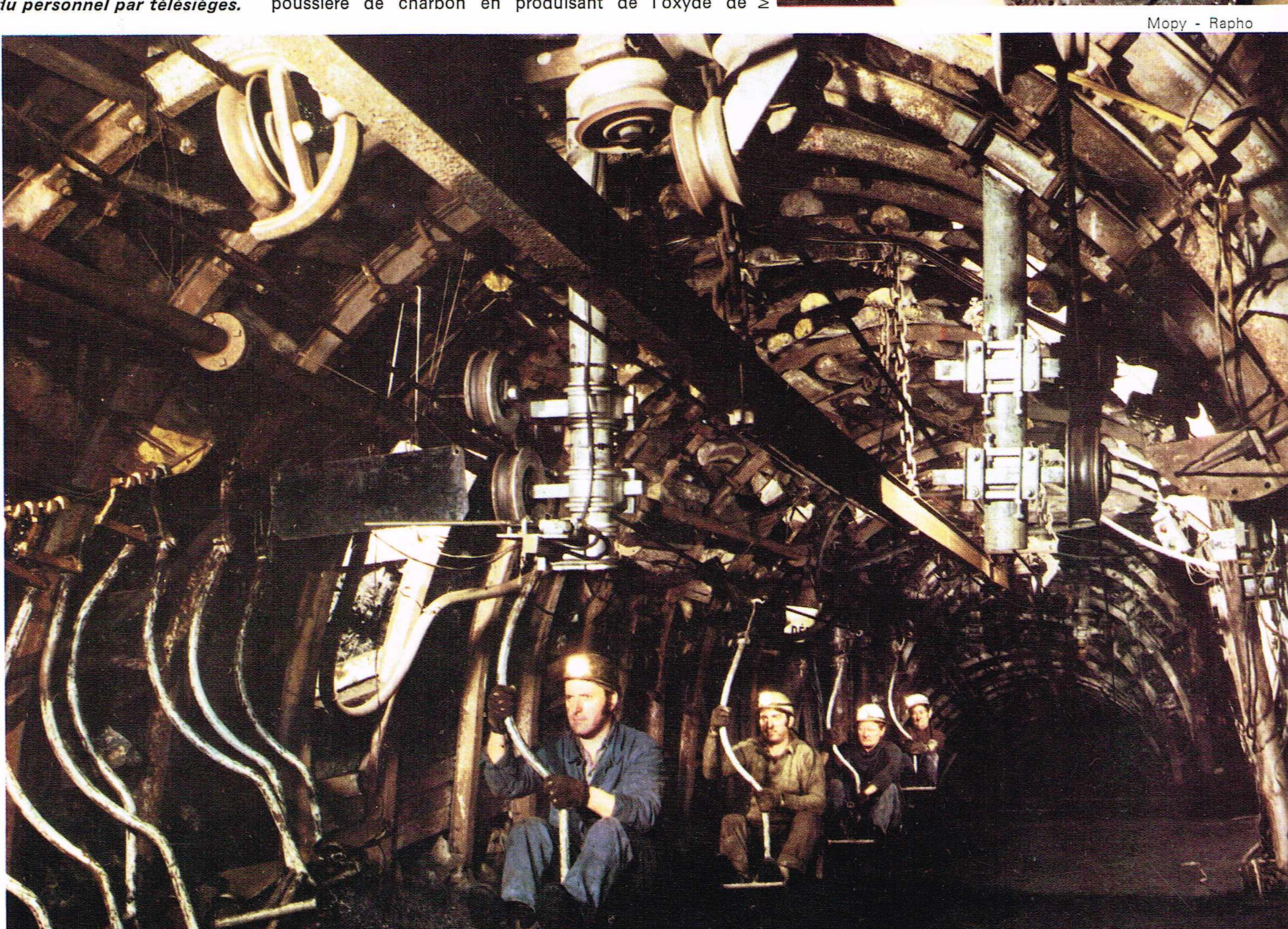
Le *grisou* est essentiellement du méthane, dont l'inflammation se propage avec violence lorsque la teneur est comprise entre 6 et 16 %.

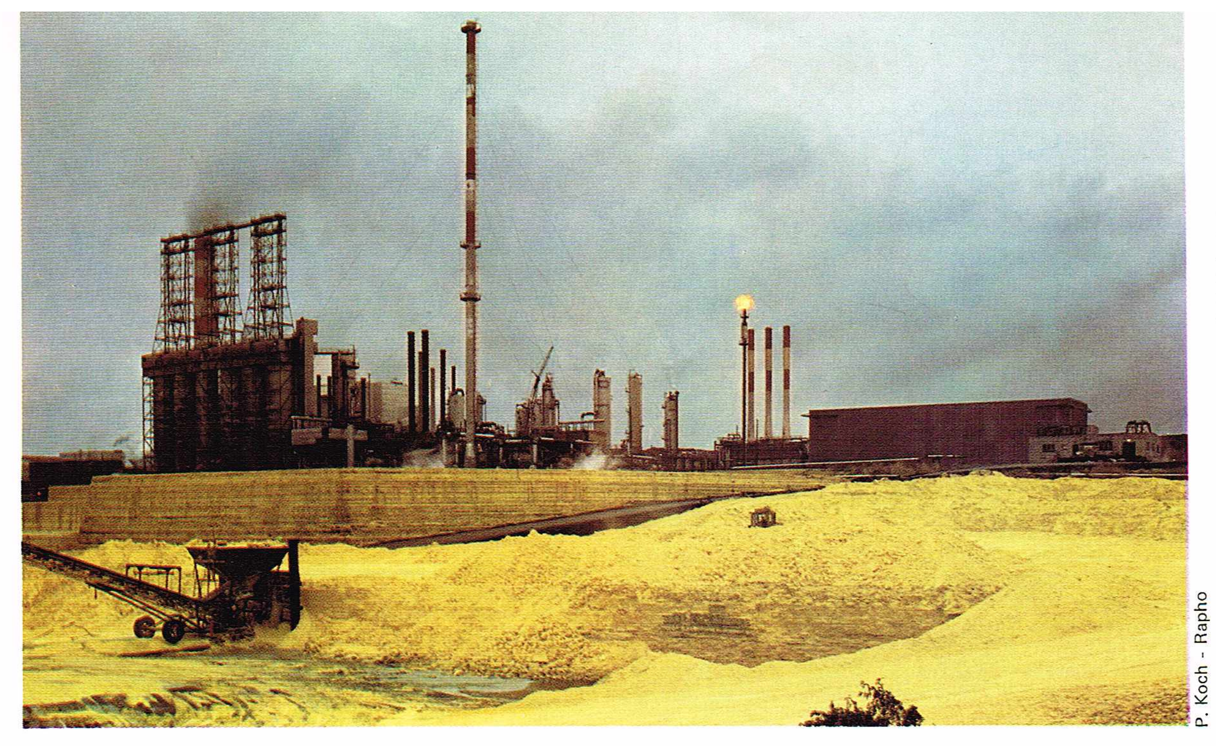
La flamme peut se propager à travers les nuages de poussière de charbon en produisant de l'oxyde de

▶▼ Deux détails de l'aménagement du bassin de la Tronquie à la mine souterraine de Carmaux (Tarn) : ci-contre, le soutènement par vérins du toit au-dessus des allées de travail ; ci-dessous, la circulation du personnel par télésièges.

Mopy - Rapho

Mopy - Rapho





◀ *Une usine de traitements des sables bitumineux dans la province d'Alberta au Canada avec, au premier plan, l'aire d'emmagasinage du soufre, produit de raffinage des sables imprégnés.*

carbone mortel. Les feux de minerai sont pour cette raison également très dangereux.

Le tragique bilan des grandes catastrophes collectives, depuis les 1 099 victimes du coup de poussière de Courrières en 1906, jusqu'aux 262 morts de l'incendie du puits de Marcinelle en 1956, est pour l'opinion publique l'expression même du danger constitué par les travaux souterrains. En fait, ce danger est limité par les efforts entrepris dans le domaine de la sécurité. L'heure du trajet du domicile au puits fait plus de morts que l'heure passée dans la mine.

Mais le danger est plus étendu. Pour un mort, les statistiques font apparaître 15 ou 20 invalidités permanentes et de nombreuses blessures légères. Aux accidents (éboulements, roulage, etc.) s'ajoute l'action des poussières sur les poumons du personnel, provoquant pneumoconioses et silicoses.

La rentabilité des mines souterraines est difficile à assurer dans ces conditions. On comprend aisément pourquoi les mines françaises sont en régression quand on sait que la géométrie du gisement est très tourmentée, et l'épaisseur des veines très faible.

Par contre, dans des conditions plus favorables, la production de charbon est concurrentielle. Les exploitations à ciel ouvert présentent d'énormes avantages techniques et également du point de vue de la sécurité d'exploitation.

Les schistes et les sables bitumineux

Les schistes et sables bitumineux désignent des roches contenant des matières organiques susceptibles d'être brûlées dans des installations thermiques (schiste d'Estonie) ou d'être traitées pour en extraire un liquide ou un gaz combustible.

Les caractéristiques et teneurs en matières organiques sont très variées : 400 litres d'huile par tonne de schiste traité en Estonie, 120 à 130 l/t au Colorado, 40 à 45 l/t dans le Bassin parisien.

C'est en France, en 1838, qu'est née la première exploitation mondiale de schiste. On a arrêté en 1955 l'exploitation d'Autun dont l'extension est limitée par les profondeurs qu'il faudrait atteindre.

La rentabilité, difficile à déterminer, de ces matériaux et les investissements énormes qu'ils nécessitent, car la valorisation n'est concevable que sur une grande échelle, font qu'ils n'ont pas fait l'objet d'une recherche systématique jusqu'en 1973.

Les sables bitumineux

Les plus grands gisements recensés se rencontrent en Angola, en Albanie, en Roumanie, en République malgache, en U. R. S. S., au Venezuela, à Trinité, au Canada et aux États-Unis. Seuls les gisements du Canada ont fait l'objet d'une cartographie complète et d'un début d'exploitation depuis 1967.

Les installations canadiennes n'ont réussi à équilibrer leur compte d'exploitation que depuis 1974.

La méthode d'extraction actuellement utilisée est celle du « nettoyage » à la vapeur et à l'eau chaude qui présente des inconvénients énormes pour l'environnement, car les eaux de traitement, chargées d'argiles et de fines poussières de sable, ne peuvent être rejetées dans les rivières.

Par contre, dans le nouveau procédé, dit d' « agglomération sphérique », développé dans la division de chimie du Conseil national de recherche du Canada, ce sont les argiles et les fines poussières qui sont agglomérées sous forme de sphères dures.

Il n'y a pratiquement qu'au Canada que l'on peut parler réellement de réserves récupérables. Ailleurs, les autres valeurs avancées correspondent plus vraisemblablement à des réserves en place et probables dans le cas de la Colombie et de la réévaluation vénézuélienne.

La conférence mondiale de l'énergie a donné les estimations suivantes (*tabl.* II) :

Tableau II

Estimation des réserves en sables bitumineux (Conférence mondiale de l'énergie, 1974)

Pays	Estimation (en millions de tonnes)
Amérique du Nord	
Canada (Alberta)	50 250
États-Unis	2 175
Autres	9
	52 434
Amérique du Sud	
Colombie	155 400 (?)
Venezuela	10 (réévaluées à 450 000)
Autres pays	
Madagascar	235
Roumanie	4
U. R. S. S.	4
Albanie	60

◀ *Tableau II : estimations des réserves mondiales de sables bitumineux faites par la Conférence mondiale de l'énergie, en 1974.*

Les schistes bitumineux

On connaît de nombreux gisements de « schistes » imprégnés. La production cumulée d'huile de schiste aurait été de 50 millions de tonnes jusqu'en 1960, époque où la concurrence pétrolière est devenue plus sévère.

Les plus importantes accumulations se trouvent aux États-Unis (Colorado, Wyoming et Utah), en U. R. S. S. (république d'Estonie), en Prusse orientale, en Chine, en Europe, au Brésil, au Zaïre, en Birmanie et en Thaïlande.

Il est très difficile de parler de réserves récupérables, car les procédés d'exploitation ne sont qu'au stade pilote.

L'effort de recherche actuelle se porte de plus en plus sur l'exploitation *in situ*. Cependant, il existe des procédés *ex situ* actuellement à l'épreuve aux États-Unis et au Brésil. Notons que l'U. R. S. S. et la Chine n'ont pas cessé d'exploiter leurs schistes car leurs gisements y sont particulièrement riches. On avance qu'une trentaine de millions de tonnes de schistes ont été traitées en 1975, soit 3 à 4 millions de tonnes d'huile (60 % de la production est brûlée comme du charbon). En Chine, il s'agit d'un gisement également charbonnier et l'on exploite les diverses couches à ciel ouvert.

Exploitation ex situ

Les procédés de traitement dérivent des recherches du Bureau of Mines.

● *Procédé NTU*

Dans le procédé NTU du Bureau of Mines, on réalise, en discontinu, une combustion à cocourant, dans un lit fixe, de schistes contenus dans l'unité. L'énergie nécessaire à la pyrogénation est fournie par la combustion du carbone résiduel déposé sur le schiste. Une partie du gaz effluent, épuré et recomprimé, peut être recyclé et injecté avec l'air pour participer à la combustion qui se fait de haut en bas. Cette technique ne permet qu'une médiocre récupération et exige de l'eau de refroidissement.

● *Procédé Union Oil*

Le procédé Union Oil fonctionne en continu. L'air qui sert de comburant au carbone résiduel est injecté en tête de l'unité. Le schiste brut est introduit par une pompe hydraulique à la base de l'unité et les couches sont éliminées à la partie supérieure. La roche est contenue dans un réservoir tronconique dont la petite section est fermée par ce que l'on appelle la « pompe à roche ». La charge de schistes est d'abord allumée à la surface supérieure du lit et l'injection d'air permet la propagation de la zone de combustion vers le bas. La pompe à roche est alors mise en route, et sa vitesse est ajustée de telle manière que le débit de schiste, à contre-courant de l'écoulement gazeux, assure la stabilisation de la zone de combustion à environ 60 cm au-dessous de la surface du lit de schiste.

Avant de quitter l'unité, le schiste est donc un peu refroidi par l'air injecté. La zone de pyrolyse se trouve au-dessous de la zone de combustion. Les vapeurs d'huile se condensent sur le schiste froid et sont récupérées dans la partie inférieure de l'installation. Ce procédé ne nécessite pas d'eau de refroidissement et s'adapte à une large gamme de dimensions de grains, mais il est nécessaire de traiter des schistes relativement riches.

● *Procédé Tosco*

Le procédé Tosco mis au point par The Shale Oil Corporation est une adaptation du *procédé suédois Aspeco*. La pyrogénation est réalisée dans un tambour, grâce à l'échange de chaleur entre le schiste et des billes d'alumine chauffées à l'extérieur de l'unité. Ce procédé devrait être étendu à l'échelle industrielle par Atlantic Richfield.

Le schiste, préchauffé par les gaz de combustion sortant de l'unité de chauffage des billes, circule dans le tambour de pyrolyse dans le même sens que les billes. Les vapeurs d'huile sont envoyées dans un système de dépoussiérage et de séparation. L'huile produite diffère peu de celle obtenue par le procédé de pyrogénation par combustion de gaz. Par contre, ce procédé fournit un gaz qui n'est pas dilué par les produits de combustion, et qui a donc un haut pouvoir calorifique.

La récupération est élevée et les débits sont importants pour un encombrement relativement faible. Cependant, cette méthode met en jeu des équipements mécaniques complexes pour assurer un broyage très fin des schistes et les qualités des billes. Enfin, le résidu est une poudre difficile à éliminer.

Exploitation in situ

Tous ces procédés laissent, après traitement, des déchets, et partant, posent des problèmes d'environnement. C'est pourquoi on se tourne de plus en plus vers la production *in situ*.

La première technique consiste à créer une porosité artificielle par fracturation à l'eau sous pression et à envoyer ensuite du sable pour assurer le soutènement des failles. On crée ainsi une perméabilité artificielle. On injecte de l'air pour assurer la combustion des schistes, allumés avec une résistance descendue dans les puits. La combustion se propage, provoquant la pyrolyse en avant du front de flamme ; l'huile peut alors sortir par d'autres puits, comme dans une exploitation pétrolière, après pompage et récupération des gaz ; le procédé est donc inspiré des méthodes thermiques de récupération assistée du pétrole. Il est, *a priori*, beaucoup plus difficile à mettre en œuvre et l'on peut douter de sa rentabilité à court terme.

On ne peut donc pas déterminer la richesse minimale permettant une exploitation rentable. On ne peut donc pas estimer les réserves récupérables en schistes bitumineux, il s'agit simplement de ressources identifiées (*tabl.* III).

▶ ***Tableau III : ressources mondiales, identifiées et hypothétiques, en schistes bitumineux.***

Tableau III

Ressources identifiées et hypothétiques en schistes bitumineux (W. C. Culberston et J. K. Pitman USGS Professional Paper 820)

Continents	Ressources identifiées (en mégatonnes)		Ressources hypothétiques (en mégatonnes)	
Rendements en huile en l/kg	0,1-0,4	0,04-0,1	0,1-0,4	0,04-0,1
Afrique	15 500	faible		
Asie	14 000	2 170	310	575 000
Océanie	faible	160		
Europe	10 900	930	15 500	31 100
Amérique du Nord	60 600	232 000	50 800	246 000
Amérique du Sud	faible	124 000		497 000
Total mondial	101 000	359 260	66 610	1 349 100

Le pétrole

Les réserves

L'estimation des réserves de pétrole est très délicate. Classiquement, on distingue :

— les **réserves prouvées**, qui correspondent à des gisements connus et à des quantités récupérables avec une quasi-certitude ;

— les **réserves probables**, qui correspondent à ce que l'on espère récupérer à partir de gisements mis en évidence, mais dont l'importance n'est pas connue avec certitude ;

— les **réserves possibles**, qui correspondent à ce que l'on peut espérer découvrir dans des provinces pétrolifères reconnues ;

— les **réserves ultimes**, qui correspondent aux estimations d'experts géologues quant aux quantités existantes d'hydrocarbures.

Au niveau des réserves prouvées, il existe une grande disparité d'une publication à l'autre, au niveau même du total mondial : de 82 700 à 94 100 millions de tonnes au 1er janvier 1976.

Importance des réserves par rapport aux besoins

Le ratio traditionnel réserves prouvées/production courante ne rend évidemment pas à lui seul compte de l'importance des réserves par rapport aux besoins, car c'est aux besoins prévisibles, en fonction d'hypothèses de croissance de la consommation, qu'il faudrait en fait se référer. Mais là, les prévisions sont hautement aléatoires.

Par contre, on peut juger historiquement de la valeur de ce ratio. Pour ce faire, on peut réaliser un ajustement linéaire de la série chronologique des réserves prouvées et de celle de la production. Ces calculs ont été faits par l'Institut français du pétrole.

Ainsi, pour une période comprise entre 1944 et 1974, on trouve, avec une bonne estimation statistique, un ratio de près de 33 ans pour les séries publiées par *Oil and Gas Journal*. S'agit-il là d'un optimum de gestion ou d'une coïncidence statistique au niveau mondial ? La question reste difficile à résoudre et les études de l'évolution de ce ratio selon les zones géographiques mettent en évidence des divergences importantes. La tendance est à la baisse pour les pays producteurs, avec une stabilisation à un niveau compris entre 10 et 15 ans.



Marc Riboud - Magnum

▲ La production quotidienne moyenne de pétrole au Moyen-Orient est 300 fois supérieure à celle des États-Unis. Ici, une unité de production de pétrole dans l'île de Das (golfe Persique).

Cette disparité est encore plus marquée quand on s'attache à la répartition des réserves suivant les zones géographiques. De plus, si l'on suit les séries chronologiques pour un même pays, on observe des variations extrêmement importantes.

Les chiffres publiés peuvent varier dans des rapports de 1 à 3 qui ne peuvent s'expliquer ni par la production, ni par la découverte de nouveaux gisements, mais par des réajustements qui traduisent une grande incertitude dans ce domaine. En fait, la définition des réserves est économique. Le taux de récupération par rapport à l'huile en place peut varier considérablement.

En effet, par les méthodes classiques d'exploitation, on ne récupère que 20 à 30 % de l'huile en place. Ce pourcentage peut être augmenté par des techniques de récupération assistée quand l'environnement technico-économique le permet. Nous reviendrons plus loin sur ce point, car l'enjeu est considérable.

De plus, la publication d'un chiffre de réserves a un contenu politique. Les intérêts ne sont pas les mêmes, du point de vue de la firme dont le but est de maximiser des bénéfices, et du point de vue d'un État producteur dont les préoccupations se situent à plus long terme et sur un plan macro-économique. Ainsi, une firme aura tendance à se satisfaire d'un ratio réserves/production (exprimé en années courantes de production) de 10 à 15 ans, alors qu'un État cherchera à avoir un ratio plus élevé.

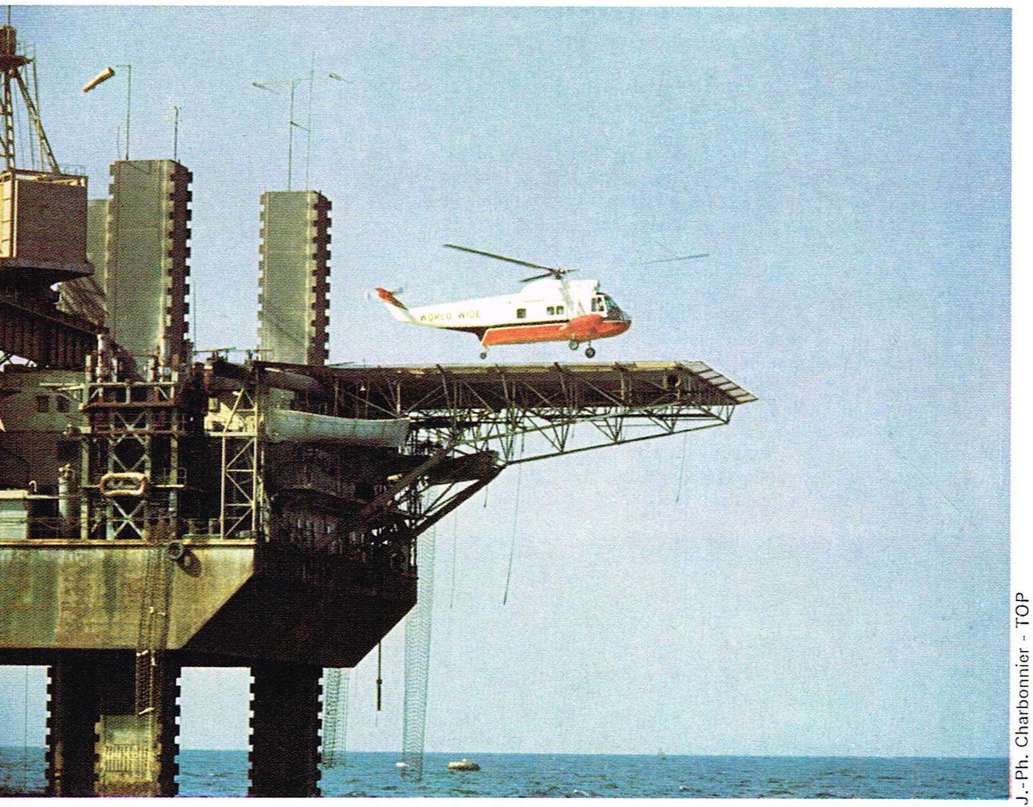
Cependant, d'un point de vue micro-économique, toute production intervenant au-delà de la 10e année ne présente plus guère d'intérêt économique. Le comportement rationnel d'un producteur disposant de réserves est d'épuiser son stock en 10 ou 15 ans, pour rentabiliser ses investissements.

Donc, cette tendance s'explique par une volonté des producteurs à maximiser leurs bénéfices autant que par un épuisement des réserves. Cette stratégie aboutit à aligner la production sur le volume des réserves, quitte à imposer à cette production un rythme de croissance supérieur à celui de la demande globale d'énergie.

Ainsi, l'industrie pétrolière, disposant d'un ratio réserve/production supérieur à l'optimum de la firme et d'un coût marginal de développement très inférieur à celui des énergies concurrentes, a pu couvrir la quasi-totalité des besoins nouveaux, au détriment du charbon, de l'uranium, etc.

Mais, depuis 1970, le rythme de découverte est inférieur à celui de la production annuelle et il devient crucial de découvrir de nouvelles réserves. C'est pourquoi l'industrie s'oriente vers la recherche dans des conditions extrêmement difficiles, en mer du Nord et en Arctique par exemple.

Ce phénomène est exacerbé par la disparité des coûts techniques de production d'un champ à l'autre. Ceux-ci varient dans un rapport de 1 à 50 entre le Koweit et la mer du Nord septentrionale ou les zones arctiques.


J.-Ph. Charbonnier - TOP

▲ *Une plate-forme de forage en acier dans l'émirat du Qatar (golfe Persique).*

▼ *La houle provoque des mouvements latéraux et un pilonnement qu'il faut atténuer par un « système compensateur de pilonnement », qui maintient la sonde au même niveau.*


Photothèque Total

Les raisons de cette disparité sont nombreuses :

— les *caractéristiques physiques* de chaque gisement : porosité, perméabilité, pression, mécanisme de production, etc. ;

— les *conditions géographiques :* climat, infrastructure routière, etc. ;

— les *conditions géologiques :* complexité sédimentologique et structurale, dureté des roches, type de piège, etc.

Ceci se traduit par des différences au niveau des débits de puits. La production quotidienne moyenne au Moyen-Orient est 300 fois supérieure à celle des États-Unis.

Ajoutons qu'aux États-Unis, il est possible de développer des champs d'importance plus faible, car ils se trouvent sur les lieux de consommation.

Les sociétés ont de plus tendance à choisir des rythmes de production inférieurs quand il s'agit de ressources se trouvant sur le territoire national, permettant ainsi un meilleur drainage et allant dans le sens de la conservation du patrimoine du pays.

Ce souci de trouver des sources d'approvisionnement politiquement plus sûres, ainsi que la nécessité de découvrir du pétrole, a conduit les sociétés à investir de façon massive depuis 1972 (21 720 M$ en 1974 par exemple) dans le secteur de l'exploration production.

La part des investissements dans ce secteur, par rapport aux investissements totaux des sociétés pétrolières, a subi une diminution de 1961 à 1971. Puis cette tendance s'est inversée pour atteindre 47,3 % en 1974, pour le monde non socialiste, et même 71 % aux États-Unis. Les États-Unis ont toujours favorisé la recherche pétrolière par une politique fiscale très favorable à ces investissements. Les soucis d'indépendance énergétique ne font que conforter cette politique.

Les coûts de production, particulièrement bas, du Moyen-Orient (0,15 dollar/baril) ainsi que l'énormité relative des réserves (57 % des réserves mondiales) sont sûrement à l'origine de la crise pétrolière actuelle. Bien que le ratio réserves/production soit supérieur à l'optimum économique d'une firme, il est passé, pour le Moyen-Orient, de 75 années de production courante en réserves en 1964 à 38 en 1973, et l'on a pris conscience qu'il ne s'agissait pas d'une ressource renouvelable. Par contre, l'euphorie de la période précédente, reposant sur des réserves importantes mais concentrées géographiquement, a permis au pétrole du Moyen-Orient de jouer un rôle directeur sur le marché mondial de l'énergie. Son prix lui permettait de se substituer aux autres formes d'énergie.

La recherche d'hydrocarbures se poursuit en mer et en Arctique. Chaque année, de nouveaux records techniques sont battus. En 1976, des forages d'exploration ont été menés à bien au large de la Thaïlande, par 1 000 mètres de profondeur d'eau. Au large de la Californie, un champ est exploité sous 259 mètres d'eau.

Cependant, ces conditions de travail difficiles influencent très fortement les coûts de production, et la rentabilité des champs est plus délicate à assurer. On doit donc trouver en mer des champs de plus grande taille afin de financer des coûts de forage et de développement 4 à 5 fois supérieurs à ceux d'un même gisement situé dans des conditions analogues mais à terre. Le financement des installations d'évacuation des terminaux vers la terre est particulièrement délicat.

En mer, la distance économique entre les champs est multipliée. Il est donc particulièrement difficile de profiter des pipe-lines construits pour de gros gisements, pour développer les petits gisements proches.

Malheureusement, dans un bassin pétrolier, il y a plus de petits gisements que de gros, et ce n'est pas parce qu'un forage d'exploration est positif que l'on a pour autant découvert un gisement d'intérêt commercial. De plus, les délais de mise en exploitation sont longs : il faut compter de 3 à 5 ans entre le premier forage et le début de la production, et davantage en mer comme l'a montré le développement des champs en mer du Nord.

L'exploitation en mer

La technologie de l'exploitation en mer évolue très rapidement. Les techniques diffèrent selon la profondeur d'eau.

Près des côtes, les supports de forage reposent sur le fond. Puis, quand la profondeur augmente, jusqu'à une

soixantaine de mètres, on utilise des *plates-formes de forage* dites *auto-élévatrices*. Ce sont des engins pourvus de grandes pattes en acier qui peuvent se rétracter pendant le transport, et reposent sur le fond pendant le forage. Ainsi, avec un même appareil, on peut forer plusieurs puits.

Au-delà, il faut utiliser des supports flottants : *bateaux de forage* et *plates-formes* dites *semi-submersibles*. Celles-ci sont maintenues à la surface par des flotteurs immergés pour atténuer l'effet des vagues. La houle provoque des mouvements latéraux, mais également un pilonnement qu'il faut éliminer pour que l'outil de forage puisse travailler dans des conditions satisfaisantes.

Ces mouvements de bas en haut sont atténués par « un système compensateur de pilonnement » qui maintient la sonde à un même niveau.

Les mouvements latéraux sont empêchés par un système d'ancrage. Cependant, quand la mer est trop forte, les systèmes classiques manquent de souplesse et risquent de rompre.

Un système d' « ancrage dynamique » a été développé et testé dans des conditions très difficiles, au Labrador par exemple. Au départ, ces systèmes ont équipé des bateaux de forage qui travaillent par des profondeurs d'eau plus grandes.

Les performances réalisées par le bateau de forage à positionnement dynamique le *Pélican* de la Compagnie française des pétroles ont prouvé l'efficacité de cette technique.

Des émetteurs placés sur le fond autour du trou envoient en permanence des signaux acoustiques à des récepteurs placés sur la coque du navire. Ces signaux donnent, avec une grande précision, la position du bateau par rapport à la tête du puits. Ils sont interprétés et analysés par un ordinateur qui met en marche des propulseurs auxiliaires. Ces derniers peuvent provoquer des mouvements du bateau dans toutes les directions, pour maintenir l'engin de forage à la verticale du trou. Des plates-formes semi-submersibles sont maintenant également équipées de ce système.

Pour développer les champs, on construit des plates-formes fixes, reposant sur le fond, à partir desquelles on effectue de 20 à 30 forages dirigés vers divers points du réservoir, dont le drainage est ainsi assuré.

Ces plates-formes sont réalisées soit en acier, soit en béton. Les plates-formes en béton reposent sur le sol marin par leur propre poids, ce qui suppose des études détaillées de génie civil. Les plates-formes en acier sont fixées sur le fond par des piliers battus sur lesquels sont fixés les montants de la structure.

Pour permettre de régulariser la production, il faut disposer d'un stockage. Celui-ci peut être incorporé dans les structures des plates-formes en béton ou construit indépendamment. Il s'agit d'énormes structures en béton entourées d'un mur brise-lames, percé d'une multitude de trous pour réduire l'énergie des vagues. On peut, de plus, y installer les appareils de traitement de la production.

La production est ensuite évacuée par pipe-line sous-marin jusqu'à la côte et en mer par des bouées de chargement de navires pétroliers.



Photothèque Total

▲ ***Un système « d'ancrage dynamique » équipe le* Pélican *de la Compagnie française des pétroles et lui permet de forer par grande profondeur.***



Photothèque Total



◀ ***Structure en béton entourée d'un mur brise-lames.***



Photothèque Total

◀ ***Un stockage en mer.***

Par de plus grandes profondeurs d'eau, on est conduit à utiliser des stockages articulés par un cardan reposant sur le fond.

De même, des têtes de puits et des stockages entièrement sous-marins reliés à des pipes ou à des supports flottants de chargement en mer sont à l'épreuve pour permettre d'exploiter les gisements mis en évidence par grandes profondeurs.

L'exploitation en zone arctique

En 1968, la découverte en Alaska de l'énorme gisement de Prudhoe-Bay, qui, avec 9,6 milliards de barils, représente le quart des réserves de pétrole des États-Unis, a démontré l'intérêt de la recherche pétrolière dans ces zones inexploitées.

Les conditions y sont extrêmement difficiles. Des températures de — 40 °C y sont fréquentes. Il fait nuit du 1er novembre au 15 février. Des vents violents (20 à 80 km/h) balayent ces régions en permanence. De plus, l'équilibre de l'environnement y est très fragile. La faune et la flore doivent être protégées avec une attention particulière.

L'inexistence des moyens de communication entraîne des frais de logistique élevés (50 % du coût total environ). Une partie du matériel doit être transportée en avion. Le sol gelé en permanence pose des problèmes de génie civil nouveaux pour les forages. Les installations doivent être isolées par rapport au sol, donc reposent sur des pieux ou sur un socle de terre compactée.

Les premières centaines de mètres du forage sont équipées d'un double tubage. Dans cet espace annulaire est installé un équipement de refroidissement ou d'isolation thermique, car la chaleur dégagée par les fluides et boues de forage ferait dégeler et fluer le sol, compromettant ainsi la stabilité de l'ouvrage.

On utilise des fluides de forage spéciaux (mousses refroidies) pour accroître la vitesse de pénétration de l'outil. Ici comme en mer, la part relative du coût propre au sondage étant plus forte que dans les conditions normales à terre, il est important de diminuer au maximum le temps d'immobilisation du matériel.

De plus, le froid intense fragilise les aciers; il faut utiliser des générateurs de vapeur pour réchauffer les outils et le matériel tubulaire afin d'éviter la rupture.

La production en mer dans ces zones implique l'utilisation de technologies nouvelles, comme des plates-formes unipodes à l'épreuve des glaces, etc.

Il faut compter 3,5 millions de dollars par forage d'exploration dans les terres arctiques et presque 9 millions en mer Arctique contre 750 000 dollars à terre et 4 à 8 millions de dollars en mer du Nord.

Les coûts d'installations des pipes sont également très élevés et comparables aux coûts de construction des autoroutes urbaines.

▼ *Le souci de trouver des sources d'approvisionnement politiquement plus sûres et la nécessité de découvrir du pétrole ont conduit les sociétés à favoriser la recherche des hydrocarbures en mer et en Arctique malgré les difficultés techniques et les investissements élevés.*



Photothèque Total

La récupération assistée

L'autre voie dans laquelle les compagnies se lancent pour augmenter leurs ressources en huile est celle de l'amélioration du coefficient de récupération.

Le taux de récupération moyen est de l'ordre de 25 %. Le taux de récupération naturel, c'est-à-dire la quantité correspondant aux forces de décompression élastique et d'expansion des gaz, n'est que de 10 %. Dans une deuxième phase, il faut utiliser des pompes, ou faire appel à des méthodes de récupération assistée.

● *Procédé par injection d'eau*

La plus ancienne méthode est celle de l'injection d'eau. Elle consiste à injecter de l'eau dans la nappe aquifère sous-jacente. Ainsi le gisement est maintenu en pression, et le balayage de l'huile par l'eau permet d'augmenter le taux de récupération de 5 à 10 %.

Cependant, on rencontre des difficultés; à cause du colmatage et de la corrosion due à l'eau, il faut prévoir une installation de déshuilage; l'exploitation est abandonnée quand la proportion d'eau est trop importante.

En effet, l'eau, qui ne se mélange pas à l'huile, a pour effet de pousser l'huile, mais également d'en « coincer » une partie dans les pores les plus fins de la roche; cette huile ne pourra plus être mobilisée à cause du jeu des forces de tension superficielle.

Pour accroître le balayage à l'échelle macroscopique, il faut augmenter la viscosité de l'eau en y ajoutant des polymères organiques, polyacryalamide ou polysaccharides par exemple.

Une autre solution consiste à augmenter le balayage à l'échelle microscopique en formant des micro-émulsions, c'est-à-dire des solutions colloïdales homogènes d'eau et de pétrole brut, stabilisées au moyen de tensio-actifs et d'alcool. Ainsi on solubilise une partie de l'huile piégée dans les micropores.

Le coût de ces additifs étant élevé, c'est un « bouchon » d'eau et de polymères ou d'eau et de tensio-actifs qui est injecté et ensuite poussé par de l'eau. Les tensio-actifs s'adsorbent sur les parois de la roche. Il faut donc pour les déplacer envoyer des solutions tampon, puis de l'eau pure. Ainsi, les diverses solutions sont mobilisées à travers le réservoir et le déclin de la production ralentit.

● *Procédé des déplacements miscibles*

Un autre grand type de procédé de récupération assistée est celui des déplacements miscibles. L'huile sera poussée par des produits qui ne forment pas d'interface, par exemple des bouchons d'hydrocarbures légers, ou par du gaz carbonique. Le gaz associé peut être réinjecté pour améliorer la récupération. Certains pays producteurs qui n'ont pas sur place un marché suffisant pour la production de leur gaz l'utilisent de cette façon. Une partie du gaz se dissout dans l'huile et abaisse la viscosité; ainsi sa mobilisation est améliorée.

Si l'on dispose d'une source de gaz carbonique importante à proximité, on peut aussi l'utiliser; cette méthode est à l'essai aux États-Unis, mais elle est difficilement généralisable, car le gaz carbonique coûte très cher à transporter.

Pour abaisser la viscosité, on peut également augmenter la température et même provoquer une pyrolyse de l'huile. L'injection de vapeur, bien qu'augmentant la température, n'a pas un rendement très bon. De plus, le coût de production de la vapeur est élevé, même si elle est injectée en alternance avec de l'eau.

● *Procédé Cofcaw*

Une autre méthode thermique est le procédé Cofcaw (Combination of Forward Combustion and Water Flooding). Elle repose sur la combustion *in situ*. L'huile est allumée en injectant de l'air et en descendant une résistance dans le puits. La zone de combustion se propage dans le réservoir. En avant de cette zone, l'élévation de température provoque une pyrolyse et donc une mobilisation des fractions légères de l'huile qui reste piégée dans la roche magasin. La combustion est contrôlée par l'injection d'air, et une meilleure répartition de la chaleur est assurée par une injection d'eau. Cette technique est développée sur des champs pilotes en Californie.

Grâce à l'augmentation des prix du brut, ces techniques deviennent rentables, du moins pour les pays producteurs et gros consommateurs. C'est pourquoi les gisements pilotes sont presque tous situés aux États-Unis et au Canada.



H. Gloaguen - Viva

▲ *L'industrie du raffinage est destinée à fournir tous les dérivés du pétrole dont un marché a besoin ; ici, la raffinerie Elf installée à Feysin (France).*

Cependant, certains pays producteurs, qui ont des plans ambitieux de développement industriel, dont le financement est assuré par les revenus pétroliers, seront aussi conduits à utiliser ces techniques (Iran, Venezuela, etc.).

Par contre, les émirats du golfe Persique et l'Arabie Saoudite n'ont pas les mêmes motivations, étant donné l'importance des réserves par rapport à leurs besoins.

Cependant, pour les gisements situés près des zones de consommation, l'espoir d'augmenter le taux de récupération de 25 à 50 % et même 60 % représente un enjeu qui n'est pas dédaignable.

Le raffinage

L'industrie du raffinage, située au point médian de la chaîne pétrolière, est destinée à fournir, par fractionnement ou recombinaison des éléments constitutifs des pétroles bruts, tous les dérivés du pétrole dont un marché a besoin.

Les produits

Les produits que l'on tire du pétrole sont très divers : on distingue les produits énergétiques et les autres. Les hydrocarbures combustibles sont utilisés pour leur commodité d'emploi et entrent dans le champ de la concurrence énergétique. Les autres répondent à d'autres soucis que de libérer des calories. C'est la nature même du produit qui répond à des applications que, le plus souvent, seule l'industrie pétrolière peut satisfaire.

● *Produits énergétiques*

La gamme des produits énergétiques s'étend depuis les gaz jusqu'aux fuels lourds.

— Les **gaz de pétrole** commercialisés sous forme gazeuse ou liquide (G. P. L.) sont les plus légers : *butane, propane.*

— L'**essence** est à la base de divers produits. L'une des utilisations majeures a été et demeure la fabrication des carburants pour les moteurs à combustion interne.

— Les **gas-oils** se sont développés à la suite de l'invention des moteurs Diesel qui sont utilisés pour la propulsion des véhicules lourds sur route et sur rail ou des navires.

— Le **fuel-oil domestique** est un gas-oil destiné à être brûlé pour le chauffage domestique et dans les petites et moyennes entreprises.

— Le **pétrole lampant** a presque disparu en Europe. Ce produit était normalement destiné à être brûlé dans une lampe à mèche.

— Les **carburéacteurs,** très voisins chimiquement, sont utilisés pour les moteurs à turbines, en particulier pour les avions à réaction.

— Les **fuel-oils** recouvrent un ensemble de produits de composition et de destination variables. On distingue le *fuel léger*, le *fuel lourd n° 1*, le *fuel lourd n° 2.* Pour respecter l'environnement, ces produits sont en général désulfurés et constituent la base de la fourniture


M. Delluc - Viva

▲ *La raffinerie B. P. à Dunkerque; l'implantation, ici dans le port d'importation, réduit au minimum les frais de transport de la matière première.*

d'énergie. Le *Bunker C* est un fuel lourd (résidu de distillation) destiné à être brûlé dans les navires en haute mer. La pollution éventuelle n'est pas prise en considération.

● *Produits non énergétiques*

Les produits non énergétiques sont très divers; on peut également les classer par leur densité qui correspond grossièrement à des propriétés particulières.

— Les **gaz** peuvent être récupérés des gaz de raffinerie ou de champ et craqués à la vapeur pour fournir de l'*éthylène*.

— Les **essences spéciales** sont des solvants organiques dont les propriétés sont utilisées dans l'industrie alimentaire pour extraire les huiles, en parfumerie, pour le nettoyage et la teinturerie, etc.

— Le **naphta** est à la base de pratiquement toute la pétrochimie européenne. Par vapocraquage, on obtient l'ensemble des produits recherchés pour la pétrochimie (*éthylène, propylène, butadiène, aromatiques*, etc.).

— Les **huiles** et les **graisses**, grâce à leur viscosité, sont recherchées pour la lubrification.

— Les **cires** et les **paraffines** sont produites lors du raffinage des huiles lubrifiantes; ce sont des corps solides qui entrent dans la composition d'isolants et de produits d'entretien.

— Les **bitumes**, première utilisation des hydrocarbures par l'humanité, sont le matériau de choix pour l'isolation et le revêtement des chaussées.

▼ *Unité de distillation du pétrole brut dans une raffinerie Total.*


Photothèque Total

Les problèmes du raffinage

Cette longue liste de produits montre que l'industrie du raffinage est complexe. Pour satisfaire aux nombreuses et différentes spécifications de tous ces dérivés et répondre à la demande du marché, le raffineur peut jouer sur quatre grands groupes de paramètres :

— les types de pétroles bruts utilisés et leurs caractéristiques techniques;

— les unités de traitement en raffinerie et leurs rendements en coupes intermédiaires ou en produits finis;

— les quantités de chacun des produits finis demandés par le marché actuel et probable;

— la taille et la position géographique des unités de traitement dont on peut disposer.

Le problème du raffinage est de combiner les moyens techniques de séparation (distillation, adsorption, absorption, extraction par solvant, cristallisation, etc.) et les procédés physico-chimiques et chimiques (craquage, reformage, déshydrogénation, polymérisation, isomérisation, etc.) afin de répondre à la demande en produits finis au moindre coût.

Le pourcentage de demandes de chaque produit varie beaucoup d'une zone géographique à l'autre. Le premier moyen consiste à jouer sur les coûts et propriétés des différents pétroles bruts disponibles sur le marché. La position géographique représente également un facteur de souplesse pour les grandes compagnies intégrées et multinationales.

Dans le monde, on peut distinguer trois sortes de raffineries en fonction de leur implantation.

— La première est constituée par les raffineries situées près des sources d'approvisionnement ou, pour les pays consommateurs, dans les ports d'importation. Ce choix, s'il réduit au minimum les frais de transport pour la matière première, ne tient pas compte des dépenses de mise en place des produits finis.

— La seconde regroupe les raffineries intermédiaires, situées entre les gisements et les marchés pour utiliser au mieux la flexibilité des sources de pétrole brut et des besoins. Ces raffineries correspondent le plus souvent à des ports de soutage importants.

— La dernière correspond aux raffineries implantées au voisinage d'un marché de consommation. Ce sont ces raffineries qui se sont développées le plus vite au cours des 20 dernières années.

La situation risque de changer parce que les pays producteurs ont la volonté de commercialiser des produits finis plutôt que du pétrole brut, car la valorisation de leurs ressources naturelles pourrait ainsi être augmentée.

Une solution pourrait consister à implanter dans les pays producteurs des raffineries de très grandes tailles mais simplifiées produisant naphta, gas-oil et fuel-oil lourds désulfurés. Ces produits semi-finis expédiés par navires vers les pays consommateurs seraient traités pour être adaptés aux exigences de chaque marché.

Pour ajuster la production à la demande, le raffineur dispose de tout l'arsenal technique des procédés. Ceci entraîne une grande complexité des raffineries, mais apporte une souplesse accrue.

Les sociétés seront ainsi amenées à utiliser des ordinateurs pour résoudre quatre grandes catégories de problèmes.

— Les études économiques d'ensemble qui fixent notamment les programmes d'investissements en fonction des perspectives d'évolution du marché.

— L'établissement des plans opérationnels de production, de raffinage, de transport et de distribution. On utilise là aussi des modèles mathématiques simulant la marche des unités et qui permettent de satisfaire à la demande en minimisant les coûts de traitement et de distribution.

— Le contrôle automatique de la marche des unités permettant un réglage très fin en fonction des variations des divers paramètres physiques.

— Les calculs d'ingénierie pour la construction des unités prévues par les programmes d'investissement. Il s'agit là de concevoir au mieux les unités répondant aux objectifs fixés.

Les techniques de raffinage

Nous ne détaillerons pas ici les divers procédés de raffinage, mais en indiquerons simplement les grandes lignes.

L'opération de base est la *distillation* qui permet de fournir les grandes « coupes ». Celles-ci servent ensuite de base aux produits finis, ou sont traitées pour obtenir des produits plus élaborés. C'est à ce niveau que l'on peut jouer le plus sur les qualités intrinsèques des divers pétroles bruts.

Les unités de conversion permettent de pallier une certaine rigidité dans les approvisionnements. La raffinerie peut soit être liée par des contrats à long terme, ou ne traiter que les pétroles bruts du groupe.

Si les déséquilibres temporaires entre les rendements de distillation et le marché peuvent être ajustés par le jeu des divers pétroles bruts, dans le cas d'un déséquilibre permanent, par exemple un marché très demandeur en essence, il faut utiliser des unités de conversion destinées à transformer des produits lourds en produits plus légers : c'est le cas aux États-Unis, par exemple.

Les *unités de craquage* fonctionnent à partir de distillats moyens ou lourds et produisent des essences.

Pour que les produits soient conformes aux spécifications en vigueur, on est amené à faire subir à certains produits des traitements de finition, par exemple la *désulfuration*, l'*adjonction d'additif*, etc.

La distillation produit deux coupes d'essences. La coupe la plus lourde est traitée par un *reformage catalytique* qui sert essentiellement à accroître l'indice d'octane de l'essence en vue de son utilisation comme carburant automobile. L'unité de reformage est donc un complément normal de la distillation.

Le raffinage est donc une technique complexe, utilisant un personnel peu nombreux mais spécialisé, nécessitant des investissements importants et dont la marge bénéficiaire est étroite (11 %).

L'*allure de marche*, c'est-à-dire le rapport entre la quantité de brut et la capacité nominale, est un facteur très important, car les frais fixes représentent 60 % du coût total. Les frais de traitements sont donc très sensibles à toute variation de l'allure de marche. Depuis la guerre du Kippour, celle-ci a particulièrement diminué, la rentabilité de toute la chaîne pétrolière est dans ce cas remise en question, surtout quand à ceci s'ajoute une hausse du prix du brut.

L'industrie du raffinage dépend en amont de l'approvisionnement en pétrole brut, et en aval du marché. Cela explique la nécessité pour l'industrie pétrolière de l'intégration verticale.

Les récents événements pétroliers tendent à détruire cette intégration, mais on peut penser qu'au-delà des préoccupations politiques, l'intérêt mutuel des pays consommateurs et des pays producteurs conduira à trouver un terrain d'entente harmonieux. Les coûts de traitement, de transport, de mise en place et de distribution sont élevés. L'industrie utilise un outil spécifique dont les contraintes économiques et techniques doivent être respectées sous peine de voir la rentabilité de l'ensemble de la chaîne pétrolière compromise.

La pétrochimie

Bien qu'il ne s'agisse pas d'utilisation énergétique des hydrocarbures, la pétrochimie représente une demande de produit pétrolier importante, environ 5 %, qui, dans les pays d'Europe, entre en concurrence avec la demande de carburant.

Les deux matières premières de base de la pétrochimie sont le **gaz** et le **naphta**, donc une coupe essence de la distillation atmosphérique.

Les procédés de base sont :

— Le *vapocraquage*, source principale des oléfines et dioléfines, mais aussi des aromatiques.

— Le *reformage catalytique*, dont le reformat à haut indice d'octane, destiné le plus souvent à la constitution des carburants automobiles, recèle une proportion importante d'aromatiques. Il y a donc pour ces produits concurrence entre leur valorisation comme constituant à haut indice d'octane des carburants, et leur valorisation en tant que produit de base de la pétrochimie. Cette concurrence est exacerbée par les mesures antipollution sur les carburants qui tendent à limiter leur teneur en plomb. Pour compenser la perte d'indice d'octane qui s'ensuit, il faut augmenter la teneur en aromatiques, qui sont également des produits polluants.

— Le *reformage à la vapeur*, qui opère une conversion des charges pétrolières en hydrogène et en gaz carbonique permettant par la suite la synthèse de l'ammoniac avec l'azote obtenu par distillation de l'air.

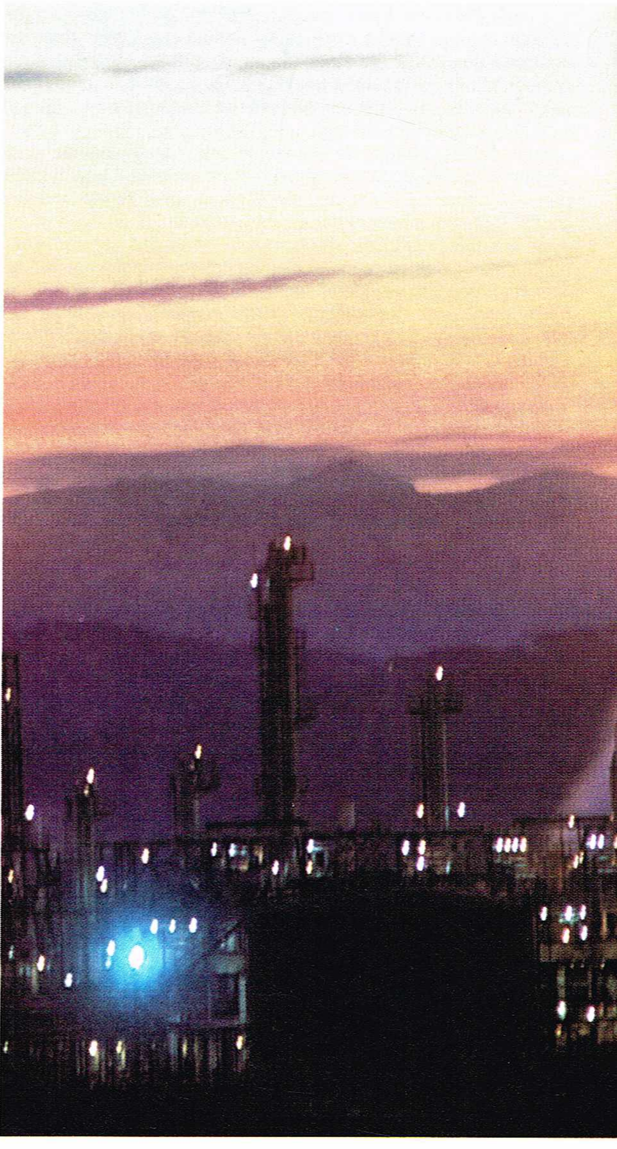
Nous ne décrirons pas ici les grands procédés de la pétrochimie (voir le volume de *Chimie*), mais cependant cette industrie, en pleine expansion, représente des besoins en hydrocarbures sans cesse en augmentation. Ajoutons de plus que les hydrocarbures trouvent sur ce marché une haute valorisation. Les produits finals sont de toutes sortes : solvants, explosifs, matières plastiques, fibres synthétiques, caoutchoucs synthétiques, engrais azotés, etc.



F. Hers - Viva

◀ Unité de vapocraquage en Hollande. Le vapocraquage est un des grands procédés de base de la pétrochimie ; il est la source principale des oléfines, des dioléfines et des aromatiques.





E. Hartmann - Magnum

▲ *Le transport intercontinental du gaz nécessite la mise en place de chaînes de liquéfaction utilisant des navires spéciaux; ici, le méthanier* Descartes *dans le port du Havre.*

▶ *Ci-contre, au centre, le gaz de Lacq est à l'origine sur place d'un grand complexe industriel qui regroupe la centrale thermique d'Artix, une usine d'aluminium et diverses industries chimiques de production de méthanol, d'acétylène, d'ammoniac, de chlorure de vinyle, etc.*

▼ *Tableau IV : estimation des réserves mondiales de gaz (1974).*

Tableau IV
Estimation des réserves de gaz
(l'Industrie du gaz dans le monde, 1974)

Pays	Estimation (en milliards de m³)
Amérique du Nord	8 870
Amérique du Sud et centrale	2 050
Europe occidentale	4 540
Europe de l'Est et U. R. S. S.	18 940
Afrique	5 510
Moyen-Orient (dont Iran 7 650)	11 900
Asie et Océanie	2 730
Total mondial	54 540

Le gaz

L'incertitude sur le taux de récupération du gaz est plus faible, du moins en ce qui concerne les gisements de gaz non associés au pétrole pour lesquels il est en moyenne supérieur de 60 à 90 % à 70 % des réserves en place.

Par contre, les réserves sont fort mal connues. Dans les pays exportateurs de pétrole, une grande partie du gaz provient de gisements où il est associé à l'huile. On peut en particulier se demander si l'on doit considérer comme réserves récupérables les quantités de gaz réinjectées dans les champs afin d'améliorer la production d'huile.

La Conférence mondiale de l'énergie indique un chiffre de 52 532 milliards de m³. *L'Industrie du gaz dans le monde* publiait pour 1974 la répartition donnée dans le *tableau* IV.

Sur la base de l'équivalence calorifique : 1 m³ de gaz naturel = 9 thermies, on peut considérer que les réserves prouvées de gaz représentent 50 milliards de tonnes d'équivalent pétrole. Donc le gaz naturel, avec plus de la moitié des réserves d'huile, devrait jouer un grand rôle dans la couverture des besoins énergétiques mondiaux.

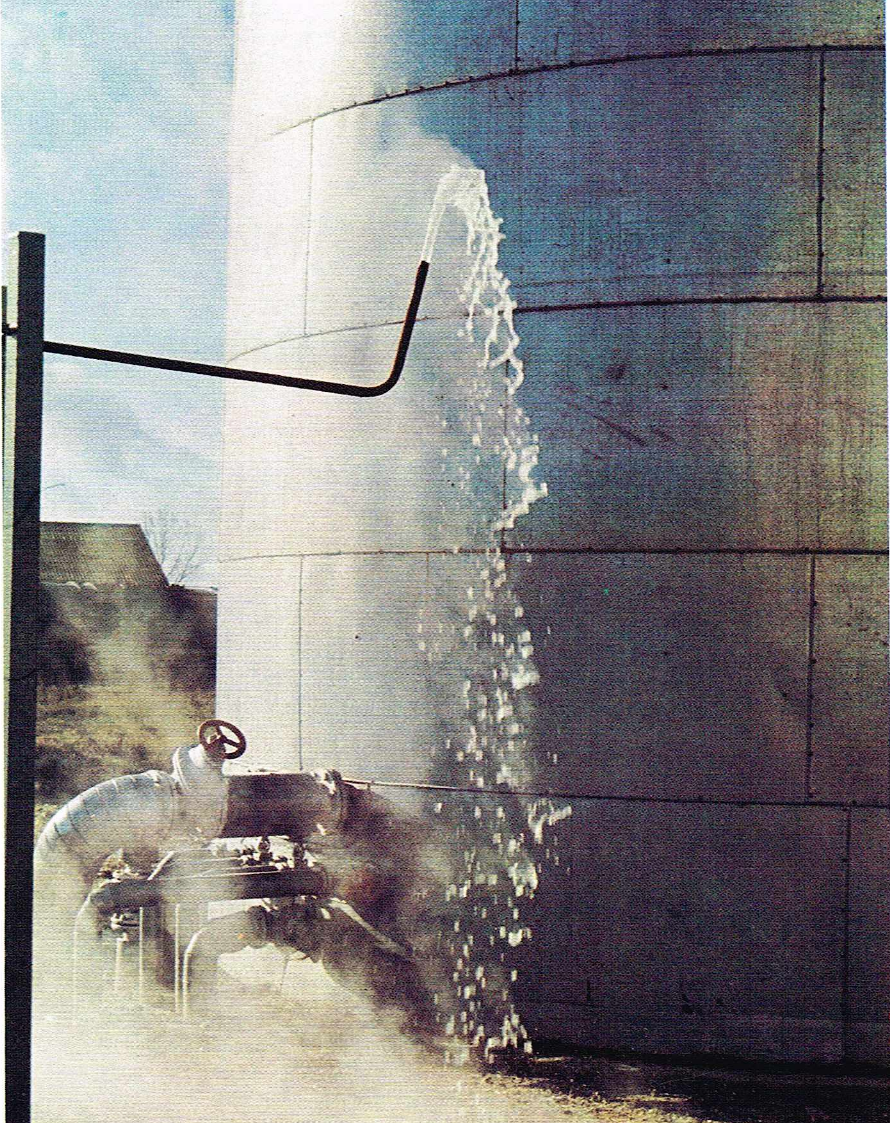
Cependant les coûts de transport sont 4 à 6 fois supérieurs à ceux du brut et il s'agit là d'un handicap majeur à sa commercialisation hors des zones développées.

Sur courte distance et à terre, on utilise des gazoducs, mais le transport intercontinental nécessite la mise en place de chaînes de liquéfaction utilisant des navires spéciaux.

En Amérique du Nord et en Europe, plus de 90 % de la production brute est commercialisée. Par contre, dans d'autres pays, plus de la moitié de la production est



H. Gloaguen - Viva



F. Proust - Sygma

▲ *La France offre un bon échantillonnage de gîtes géothermiques « basse énergie »; dans le Bassin parisien, notamment, les calcaires du Dogger forment un réservoir d'eau à 70 °C utilisée pour le chauffage domestique à Melun, Creil et Villeneuve-la-Garenne. Ici, l'usine géothermique de Melun.*

brûlée à la torche ou réinjectée. Il y a là une source d'erreurs quant à l'estimation de la production, car on risque de compter plusieurs fois les volumes réinjectés.

Le potentiel gazier de l'Amérique du Nord n'a pas été correctement développé, car, pendant très longtemps, une tarification trop basse a conduit à stopper l'effort de recherche.

L'Europe occidentale, province gazière plus récente, dispose de réserves aux Pays-Bas et au Royaume-Uni et d'un potentiel important en mer du Nord, lequel n'a pas encore atteint son régime de croisière.

Partout ailleurs, il y a pléthore de gaz naturel. Ceci explique que des pays comme le Venezuela développent leur industrie chimique à partir du gaz naturel. Par craquage du méthane à la vapeur, on obtient des *oléfines*, bases de nombreux produits de synthèse. Ainsi le gaz naturel qui ne trouve pas sur place un débouché suffisant est hautement valorisé et transformé en produits susceptibles d'être exportés avec profit.

Ajoutons que, si l'industrie pétrolière et gazière ne génère que peu d'emplois, les industries chimiques en aval sont par contre un facteur de développement important.

Le gaz se substitue facilement aux combustibles liquides et présente même dans certains cas des avantages annexes importants pour l'utilisateur (souplesse d'emploi, propreté, etc.).

Son utilisation supposant une infrastructure de transport lourde implique une plus grande stabilité quant aux prix. Utilisateurs et producteurs sont solidaires pour le transport et l'écoulement, et les contrats d'approvisionnement sont signés pour des périodes longues.

La géothermie

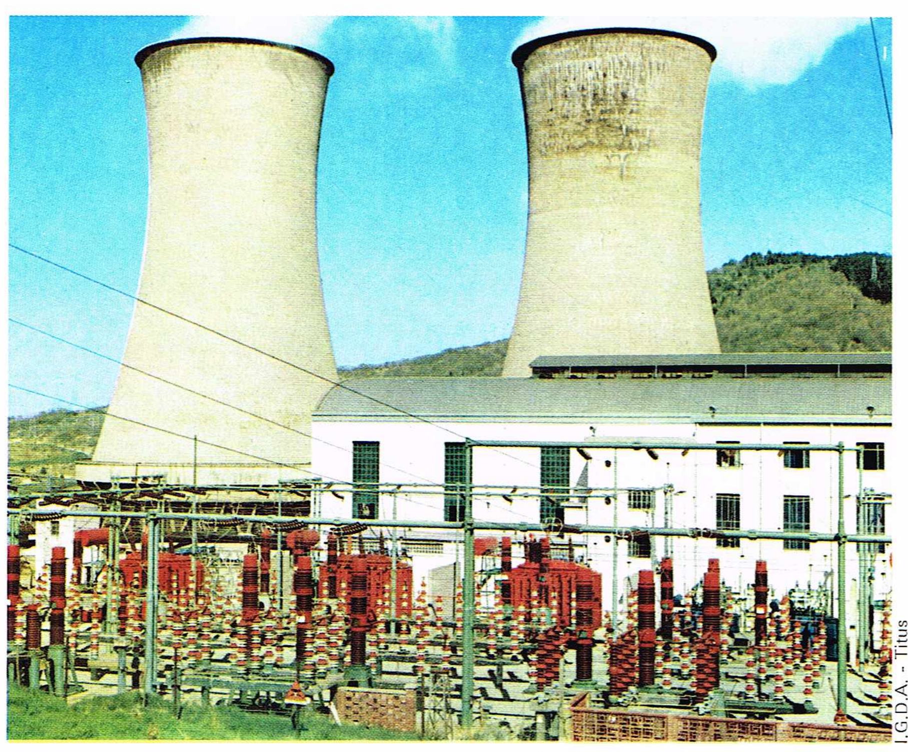
Origine et caractéristique de la chaleur terrestre

Tout le monde sait que, dans la Terre, la température s'accroît avec la profondeur (en moyenne de 1 °C tous les 30 mètres). Ceci se traduit par un certain nombre de manifestations naturelles : volcans, geysers, sources chaudes, etc. La géothermie recouvre l'ensemble de ces phénomènes ainsi que leur utilisation.

Les isotopes radio-actifs contenus dans le manteau et la croûte terrestre suffisent à assurer le flux de chaleur observé qui correspond à une puissance de $3 \cdot 10^{10}$ kW. La quantité de chaleur totale contenue dans les deux premiers kilomètres de la croûte est estimée à environ $3 \cdot 10^{10}$ kcal, ce qui représente un potentiel énorme et des réserves énergétiques importantes, si l'on arrive à la mobiliser dans des conditions économiques acceptables.

L'homme a su, depuis longtemps, en tirer profit : thermalisme, production d'énergie mécanique et électrique, production de calories pour le chauffage. La Hongrie a joué dans ce domaine le rôle d'un précurseur.

On parle de *haute énergie* quand on utilise la vapeur pour produire de l'électricité et de *basse énergie* lorsque l'on utilise l'eau chaude pour le chauffage. Autour de 180 °C, la frontière entre ces deux domaines n'est pas très nette car on peut faire appel à des cycles thermodynamiques avec fluides intermédiaires pour produire l'énergie.



I.G.D.A. - Titus

▲ *Tours de refroidissement de la centrale électrique de Larderello en Toscane, dont la puissance installée est de 365 MW. Ce site géothermique est lié à la présence de soufflards dont la température est comprise entre 100 et 175 °C.*

Géothermie « basse énergie »

La France offre un bon échantillonnage des gîtes géothermiques « basse énergie ». L'inventaire en a été réalisé par le Bureau de la recherche géologique et minière (B. R. G. M.). C'est d'une manière générale dans les bassins sédimentaires, les fossés d'effondrement et les zones de subsidence que l'on rencontre des nappes aquifères profondes à une température suffisante.

Les calcaires du Dogger (Jurassique moyen), dans le Bassin parisien, forment un réservoir d'eau à 70 °C, sur une surface de 5 000 km^2 pour une profondeur de 2 000 mètres. Cette eau est utilisée pour le chauffage domestique à Melun, Creil et Villeneuve-La-Garenne.

La nappe de l'Albien, moins profonde (550-800 m) mais d'une température de l'ordre de 30 °C, est exploitée comme eau potable et pour le chauffage de la Maison de la radio.

Les niveaux gréseux du Permien et du Trias, à l'est et au sud du bassin, atteignent 70 °C vers 2 000 mètres.

Les sables du Lusagnet, dans la région de Toulouse, contiennent de l'eau à plus de 50 °C.

La limagne d'Allier et l'Alsace ont des gradients géothermiques irréguliers, car ce sont des fossés d'effondrement. On y rencontre donc localement des conditions plus favorables que dans les bassins sédimentaires. Dans la région de Pechelbronn, on enregistre 8,5 °C/100 mètres. Le réservoir est constitué par les grès bigarrés du Trias (180 °C à 1 800 mètres). A la base des formations sédimentaires de l'Allier, on rencontre des températures de 125 °C.

En Hongrie, zone de subsidence, les formations tertiaires du Pannonien constituent des réserves importantes (70 °C à 1 500-2 000 mètres). Le chauffage des serres et le thermalisme y sont très répandus. La ville de Szeged utilise la géothermie depuis 1962. Les conditions sont très favorables de par l'importance des réserves et la qualité de l'eau qui n'a pas besoin d'être réinjectée.

Géothermie « haute énergie »

Les sites géothermiques à haute énergie sont liés aux phénomènes volcaniques actuels. L'usine de Larderello en Italie a une puissance installée de 365 MW, et celle de Monte Amiata de 25 MW. The Geyser en Californie représente 400 MW. Il est prévu pour les États-Unis une puissance de 958 MW en 1980. On compte également 202 MW en Nouvelle-Zélande, 78,5 MW au Mexique (458 MW en 1980), 118 MW au Japon (387 MW en 1980), 30 MW au Salvador, 38 MW en U. R. S. S. (140 MW en 1980). En Guadeloupe, à Bouillante, un gisement à 240 °C par 300-400 mètres est exploité (4 MW)...

En Islande, la puissance électrique installée est de 20 MW. La longueur de la saison de chauffe, 340 jours par an, est un facteur très favorable pour assurer la rentabilité des installations de chauffage. Ainsi, plus de 40 % de la population est chauffée par la géothermie. On y extrait de l'eau à 128 °C pour des profondeurs de forage entre 700 et 2 000 mètres.

▶ *Page ci-contre, en bas, l'exploitation « haute énergie », ici en Nouvelle-Zélande, nécessite des installations complexes et donc de gros investissements dont la rentabilité n'est assurée que par des utilisateurs locaux.*

▶ *Le Mexique est également un site géothermique « haute énergie »; la puissance électrique actuelle de de 78,5 MW sera portée, en 1980, à 458 MW.*

Exploitation

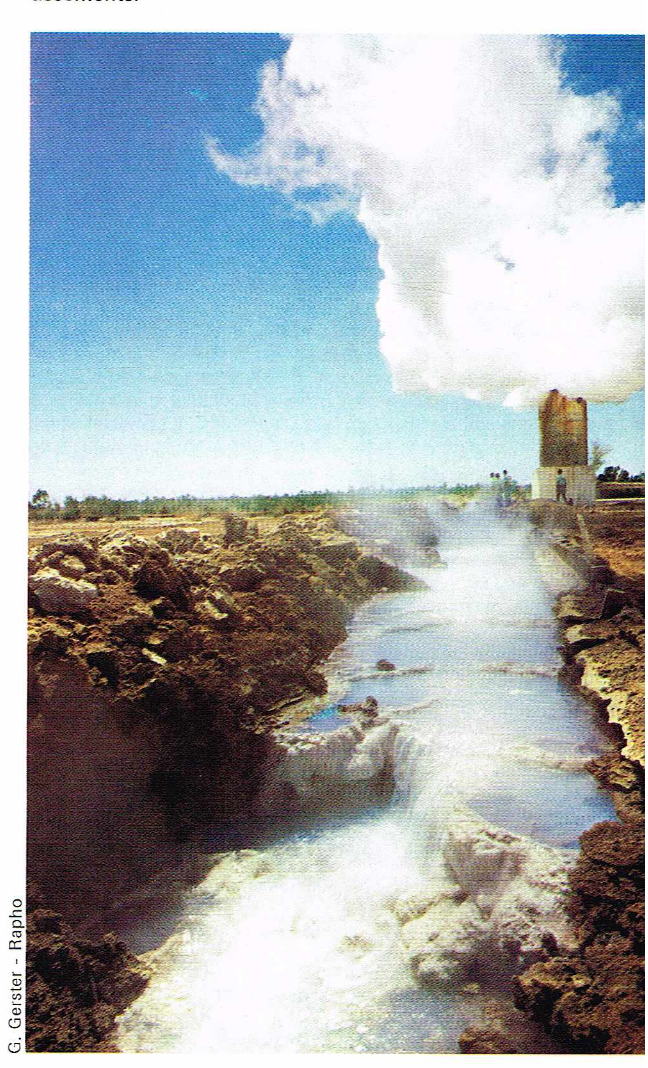
Exploitation « basse énergie »

D'une manière générale, une installation géothermique comporte un « doublet » de forage. L'un d'eux sert à l'extraction de l'eau chaude qui est envoyée vers les échangeurs de température, l'autre à la réinjection de l'eau qui, de par sa salinité et son aggressivité, ne peut être utilisée directement.

Les échangeurs doivent donc être particulièrement résistants à la corrosion. Depuis l'expérience de Melun, on utilise des échangeurs au titane.

La puissance thermique d'un doublet est donc fonction du débit d'eau ; notons que la réinjection de l'eau permet de maintenir la nappe en pression. Les modèles de gisements développés à l'Institut français du pétrole montrent que, pour augmenter la puissance calorifique d'un doublet, il est plus intéressant d'abaisser la température de réinjection au maximum, plutôt que de doubler le débit. C'est pourquoi, en plus des échangeurs, on utilise des pompes à chaleur permettant de réinjecter de l'eau à 7 °C. Ce phénomène s'explique par l'importance des pertes thermiques par les épontes.

La durée de vie du gisement est peu affectée par cette faible température. En outre, cette grande consommation de calories géothermales permet de rentabiliser les investissements.



G. Gerster - Rapho

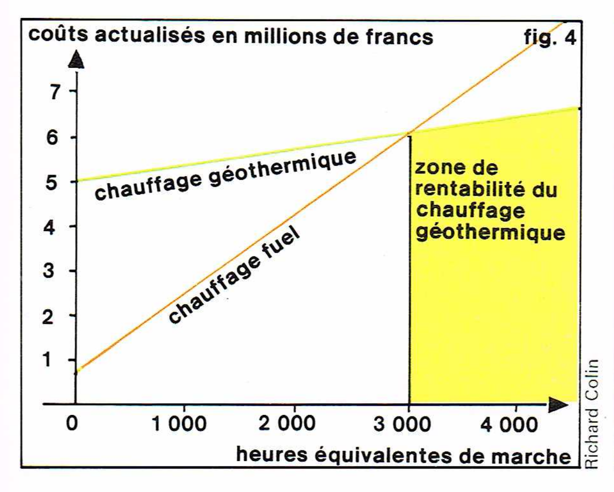


Tableau V

Comparaison entre chauffages classique et géothermique

Répartition des frais	Chauffage classique	Chauffage géothermique
Coût d'installation pour 3 kth/h	600 000 F	5 000 000 F
Coût d'exploitation à la kth/h :		
P_1 (combustible)	50 F	—
P_2 (entretien, personnel)	15 F	10 F
P_3 (grosses réparations, renouvellement)	10 F	5 F

C'est sur ce principe que fonctionne l'installation de Creil.

Si la géothermie permet d'utiliser une énergie dont les frais d'exploitation sont faibles, il n'en demeure pas moins que les investissements sont bien supérieurs à ceux d'une installation classique.

Le tableau de comparaison entre un chauffage classique et un chauffage géothermique nous donne les valeurs de l'investissement et des frais d'exploitation à pleine puissance (*tableau* V). Si l'on construit les courbes de coût actualisé (11 % sur 20 ans) en fonction du nombre d'heures équivalentes de marche à pleine puissance, on constate que la rentabilité n'est assurée qu'à partir de 3 000 heures équivalentes (*fig.* 4).

La géothermie ne peut donc, à elle seule, assurer, dans des conditions de rentabilité suffisante, le chauffage de logements dont le nombre d'équivalence de marche à pleine puissance est d'environ 1 800 heures dans la région parisienne. Il faut donc utiliser la géothermie comme chauffage de base pour un grand nombre de logements.

Exploitation « haute énergie »

La production d'électricité nécessite des températures élevées. Les conditions d'exploitation diffèrent suivant la pression hydrostatique du réservoir. Si celle-ci est proche de la pression d'ébullition correspondant à la température du fluide, la vapeur se formera dans le réservoir et arrivera sèche à travers ce forage. Si la température est plus basse, le fluide peut monter dans le puits ; dès lors, la séparation des phases se produit en partie pendant la remontée. La vapeur entraîne l'eau plus froide, qui est corrosive, et doit donc être séparée avant d'être envoyée dans les turbines.

Dans un cas comme dans l'autre, la géothermie nécessite de gros investissements dont la rentabilité n'est assurée que par des utilisateurs locaux.

Les autres formes d'énergie ne se sont développées que par des sociétés qui s'appuient largement sur la collectivité (charbonnages, E. D. F.-G. D. F., sociétés pétrolières, etc.). La part relative des investissements est donc très importante, en particulier pour le chauffage domestique. Il est souhaitable qu'une part du risque géologique soit prise en charge par l'État, afin de permettre le développement de ces ressources « indigènes ».

Les ressources d'origine mécanique

Les ressources marémotrices, analogues aux ressources hydrauliques classiques, en diffèrent cependant par trois points essentiels : changement de sens du flux deux fois par jour, faiblesse de la hauteur de chute et corrosivité redoutable de l'eau de mer.

Si les installations de la Rance démontrent l'intérêt de ces ressources, il n'en demeure pas moins que les sites aménageables sont rares.

La Corée du Sud et l'Inde ont commencé quelques études. La Norvège présente des côtes dont le relief serait *a priori* propice, mais les hauteurs des marées sont trop faibles. Au Canada, la baie de Fundy connaît une des marées les plus fortes du monde, atteignant 16 mètres à l'équinoxe contre 13,5 m dans la Rance. Il y a là un site qui pourrait devenir rentable, étant donné les prix actuels des énergies concurrentes. La puissance installée serait d'environ 2 GW. En Argentine, la péninsule de Valdez offre un potentiel de 600 MW avec des turbines réversibles. La côte nord-ouest de l'Antarctique présente des hauteurs de marée suffisante (11 mètres).

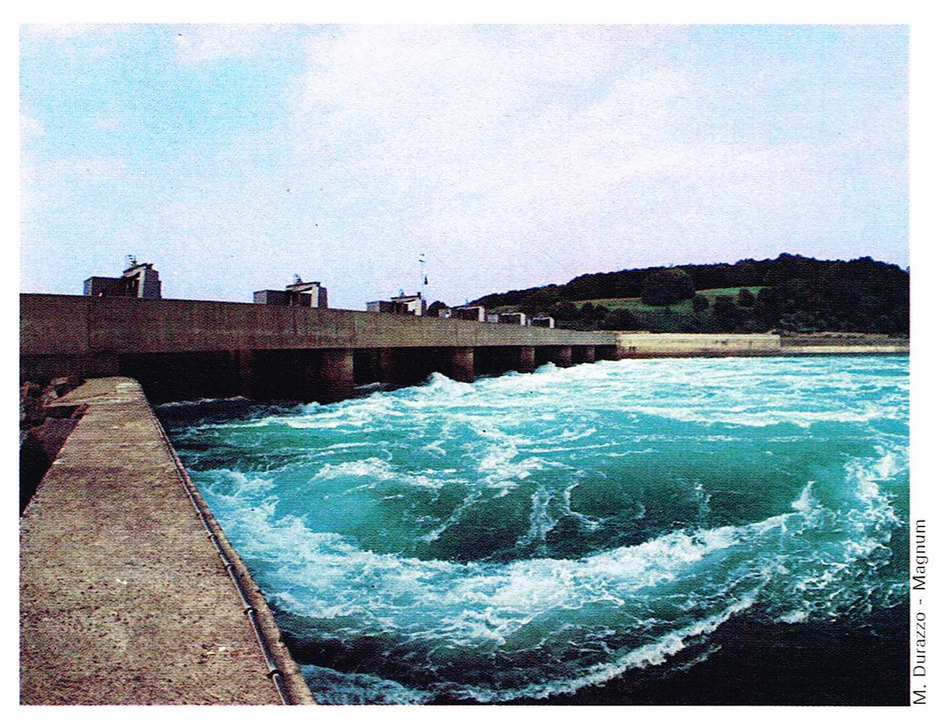
Cependant, l'utilisation de tous les sites possibles dans le monde ne conduirait qu'à une puissance de 13 à 20 GW.

D'autres sites existent : la Firth de Soway et l'estuaire de la Severn, en Angleterre, la baie de Cook sur la côte méridionale de l'Alaska et une zone très importante de la mer Blanche en U. R. S. S.

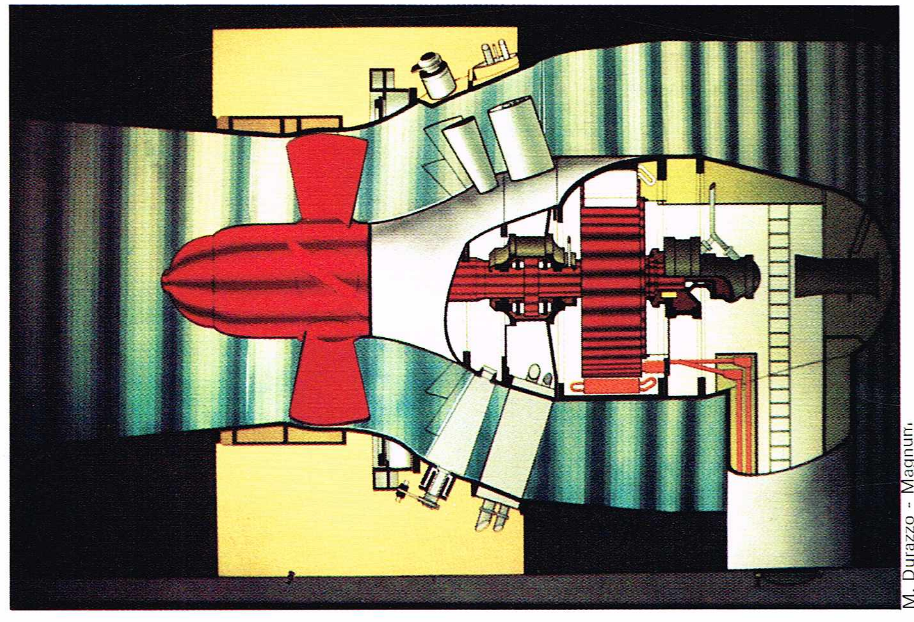
▲ A gauche, figure 4 : courbes de coûts actualisés en fonction du nombre d'heures équivalentes de marche pour un chauffage géothermique et un chauffage au fuel.

A droite, tableau V : comparaison des valeurs de l'investissement et des frais d'exploitation entre un chauffage géothermique et un chauffage classique.


M. Serraillier - Rapho



M. Durazzo - Magnum



M. Durazzo - Magnum

▲ *Les installations de la Rance, dont on voit, en haut, le barrage, et, ci-dessus, une représentation schématique des turbines, démontrent l'intérêt des ressources marémotrices comme source d'énergie appréciable, mais il reste que les sites aménageables sont rares.*

Si l'idée est physiquement très intéressante, malheureusement les réalisations ne sont pas à l'échelle du problème économique.

La qualité d'un site marémoteur dépend de trois facteurs : l'*amplitude de la marée* et donc la chute disponible, la *taille du réservoir* dont dépend la quantité d'énergie produite, la *longueur de barrage* à réaliser qui conditionne le coût des ouvrages.

L'amplitude de la marée étant variable tout au long de l'année, la puissance disponible l'est également. Les marées sont caractérisées schématiquement par un cycle de deux semaines : les marées de vive-eau, les marées de morte-eau. Il est donc difficile d'assurer un minimum de puissance garantie.

On peut, par exemple, turbiner entre deux bassins pour obtenir une puissance variable mais continue.

L'usine marémotrice de la Rance utilise un autre système.

Pendant les *marées de morte-eau*, on utilise un cycle à simple effet, car la chute est faible. Le turbinage ne s'effectue que dans un sens unique, celui du reflux car le rendement des machines est meilleur dans ce sens. De plus, on fait appel au pompage direct pour assurer un surremplissage du bassin en vue de stocker davantage d'eau et d'augmenter la chute.

Par contre, pour les *marées de moyenne et de vive-eau*, c'est-à-dire supérieures à 10 mètres, le flux et le reflux sont utilisés pour la production d'électricité. C'est le *cycle à double effet*, caractérisé par une production quasi continue.

A noter que du fait du turbinage inverse, le niveau maximal dans le bassin est plus bas que le niveau maximal côté mer. Pour la phase suivante d'exploitation en turbinage direct (bassin-mer), la chute et le stock sont réduits, mais le gain qu'apporte le turbinage inverse est très supérieur à cette perte.

Il est très difficile de faire coïncider la fourniture d'énergie avec les heures de pointe. Même avec les cycles les plus élaborés et en avançant ou retardant le turbinage, l'usine n'a pas encore assez de souplesse.

Une usine marémotrice ne peut éviter la construction d'une usine thermique que dans un réseau où il y a déficience d'énergie et non de puissance installée. Cependant, après sept années d'exploitation de l'usine de la Rance, on peut dire que sa disponibilité est remarquable, les objectifs de production sont atteints et l'exploitation se déroule sans problème majeur. Les marées offrent donc une source d'énergie appréciable mais dont l'intérêt n'est que régional.

L'énergie nucléaire

Pour la production d'énergie nucléaire, l'uranium et le thorium sont les deux matériaux fissiles que l'on peut employer. Actuellement, on utilise industriellement l'isotope naturel ^{235}U. A terme, il semble que l'on sera conduit à mettre au point des filières « thorium-^{233}U » dans les surrégénérateurs et les réacteurs convertisseurs à haute température.

Les réserves

Les réserves de thorium

La production mondiale est estimée à 1 000 t/an et les réserves récupérables, au seuil de 26 $/kg, sont évaluées à 1,7 million de tonnes.

La faiblesse du marché et l'importance des réserves connues n'ont pas favorisé une exploration systématique. Il n'est pas possible de compter le thorium comme réserve énergétique prouvée ; il s'agit là d'un potentiel probablement équivalent à celui de l'uranium et quasi illimité avec la mise au point des surrégénérateurs.

Les principales réserves de thorium (sous forme de monazite qui est un phosphate de terre rare et de thorium) sont situées au Brésil avec 1,1 Mt dans les États du Sud-Est, en Inde avec 0,3 Mt dans le Kerala, en Norvège avec 0,26 Mt dans le Telemark, au Canada avec 0,16 Mt (il s'agit d'un combiné uranium-thorium).

Les réserves d'uranium

Il s'agit de tonnes d'uranium « naturel » (composé de 99,3 % de ^{238}U et de 0,7 % de ^{235}U).

Dans le cas de l'uranium, le seuil critique de définition des réserves économiques est calculé en *dollars américains par livre anglaise* ($/£), mais, généralement, il s'agit d'un coût de production du « Yellow Cake », c'est-à-dire de U_3O_8.

L'uranium a vu ses prix très fortement revalorisés de 5 $/£ U_3O_8 en 1972 à 15 à 20 $/£ au milieu de 1975. De plus, le coût du minerai intervient assez peu dans le coût de production du kWh ; on peut donc considérer comme réserves prouvées les quantités d'uranium dont le coût est inférieur à 15 $/£ U_3O_8 (39 $/kg), et comme réserves supplémentaires celles dont le coût est inférieur à 30 $/£ U_3O_8.

L'accroissement des réserves en fonction du prix peut être considérable. Ainsi, l'US Atomic Energy Commission a estimé en 1971 qu'à 100 $/£, les États-Unis disposeraient de 17 millions de tonnes de U_3O_8, contre 1,6 million de tonnes à 15 $/£.

On peut avancer comme *réserves récupérables*, au seuil de 15 $/£ U_3O_8 (Conférence mondiale de l'énergie), 1 955 000 t. Pour les *réserves supplémentaires*, au seuil de 30 $/£ U_3O_8, 3,5 Mt semble un chiffre pessimiste. Les estimations publiées en juillet 1975 par André Giraud sont de 4,7 millions pour les réserves raisonnablement assurées au seuil de 30 $/£.

Les estimations sont d'une extrême fragilité et constituent sans doute un minimum. La géologie de l'uranium est complexe et l'exploitation des mines difficile.

En outre, il existe des quantités importantes d'uranium (dans les schistes, les phosphates et l'eau de mer) dont l'exploitation est très coûteuse et donc hypothétique.

On ne dispose pas d'estimation sérieuse pour les pays communistes. Les chiffres suivants ont été avancés :

80 000 à 270 000 t en U. R. S. S.
20 000 à 100 000 t en Chine
100 000 t en R. D. A.

Le *tableau* VI donne les réserves estimées par la Conférence mondiale de l'énergie en 1974.

Tableau VI

Réserves estimées en uranium à des coûts inférieurs à 39 $/kg d'uranium contenu, soit 15 $/£ U_3O_8 (Conférence mondiale de l'énergie, 1974)

Pays	Estimations (en tonnes d'uranium naturel)
États-Unis	730 000
Canada	308 000
Amérique du Nord	1 038 000
France	45 000
Espagne	7 000
Portugal	7 000
Suède	270 000
Autres pays	13 000
Europe occidentale	340 000
Afrique du Sud	264 000
Niger	50 000
Gabon	20 000
Autres pays	11 000
Afrique	345 000
Australie	160 000
Amérique latine	33 000
Asie	39 000
Monde non communiste	1 955 000

◀ *Tableau VI : estimation des réserves mondiales d'uranium faite à la Conférence mondiale de l'énergie, en 1974.*

Équivalence énergétique des réserves d'uranium

Les pouvoirs calorifiques inférieurs des combustibles « chimiques » fossiles nous permettent de déterminer des coefficients d'équivalence en ce qui concerne les usages thermiques primaires. Par contre, la comparaison est plus délicate avec les combustibles nucléaires.

Une équivalence n'est possible que s'il y a substitution et le coefficient n'est valable que pour cette substitution.

Pour les *usages électrogènes*, l'équivalence s'établira sur la base du kWh électrique ; pour les *usages thermogènes*, l'équivalence s'établira sur celle du kWh thermique.

Si l'on se limite à la seule production d'électricité, il convient de fixer l'étape à laquelle on localisera la substitution.

Équivalence à la production : tant que la part de l'énergie nucléaire, dans le bilan primaire, ne dépasse pas 15 %, tout kWh d'origine nucléaire peut être considéré comme se substituant au niveau de la production à 1 kWh d'origine thermique et, par conséquent, permet d'économiser 0,230 kg de fuel-oil ou 0,350 kg de charbon.

Équivalence à la consommation : au-delà de la demande spécifique d'électricité, le kWh supplémentaire remplace une certaine quantité d'hydrocarbures liquides ou gazeux,


Pierre Jahan - CEA


Pierre Jahan - CEA

▲◀ *La géologie de l'uranium est complexe et l'exploitation des mines difficile. L'extraction du minerai peut se faire en mine souterraine (ci-dessus) ou à ciel ouvert (ci-contre) comme ici sur les gisements des Carpières en Vendée (France).*


F. Bibal - Rapho

▲ ***Prospection au compteur dans la mine d'uranium de Bessines (France). La France est un des deux pays en Europe occidentale, avec le Portugal, à avoir une production notable.***

ou même de charbon dans les usages thermiques finals. Pour les besoins du chauffage domestique et industriel, 1 kWh d'origine nucléaire ne se substitue plus qu'à 0,110 g de fuel-oil. Il y a donc là un risque de surestimer le rôle du nucléaire dans la satisfaction des besoins énergétiques futurs.

Une autre difficulté naît des différences de performances de chaque type de centrale nucléaire. Schématiquement, on peut admettre les consommations spécifiques annuelles suivantes :

— filière graphite gaz uranium naturel : 200 à 250 kg d'uranium/mégawattheure électrique (MWe) plus 600 kg/MWe pour le premier cœur ;

— filière uranium naturel eau lourde (Candu) : environ 100 kg U/MWe plus 160 kg/MWe pour le premier cœur ;

— filière uranium enrichi eau légère : 100 à 130 kg U/MWe plus 100 à 500 kg U/MWe pour le premier cœur ;

— filière surrégénératrice : 5 à 6 kg U appauvri/MWe plus 1,5 kg Pu/MWe, plus 13 à 14 kg U appauvri/MWe, plus 3,5 kg Pu/MWe pour le premier cœur.

Suivant les différentes options possibles, l'équivalence énergétique de l'uranium peut varier de 1 à 8 pour les filières à neutrons lents et de 1 à 200 si les performances probables des surrégénérateurs sont prises en considération.

Une évaluation prudente fondée sur les centrales électrogènes à eau légère aboutit à l'équivalence :

1 tonne d'uranium naturel = 9 000 tonnes de pétrole (1 kWh = 0,230 kg de fuel-oil).

L'estimation actuelle représente donc environ 20 % des réserves de pétrole brut. Il s'agit probablement d'un minimum qui ne représente que 7 ans de production annuelle.

Si on compare ces réserves par rapport aux besoins prévisibles résultant des plans de développement accéléré, on peut craindre un épuisement des réserves vers 1990.

Ce manque apparent est atténué par les espoirs qu'engendre la mise au point des réacteurs surrégénérateurs. En effet, on pense qu'un surrégénérateur « brûle » en moyenne 30 à 60 fois moins d'uranium ; ceci s'applique à la première charge. Le surrégénérateur fabrique plus d'éléments fissiles qu'il n'en consomme en transformant ^{238}U en plutonium qui est un combustible nucléaire. A terme, les centrales surrégénératrices permettraient de transformer un problème de ressources limitées en une question de capacité maximale installable, du moins si l'on fait abstraction de tout problème d'implantation ou de risque écologique. En principe, la demande d'uranium devrait donc passer par un maximum.

L'enjeu est considérable, car on pourrait disposer d'une source renouvelable d'énergie à très haut niveau. Cependant, il convient de ne pas cacher les difficultés de mise en œuvre.

Le temps de doublement du cœur est estimé entre 20 et 30 ans, ce qui, à la limite, permet de supporter une croissance illimitée pourvu que le taux de croissance n'excède pas 3 à 3,5 % par an.

Le développement des surrégénérateurs, à un rythme plus rapide, nécessite celui des centrales à neutrons lents plutonigènes. On calcule qu'il faut faire fonctionner pendant 10 ans une centrale à eau légère pour fournir le plutonium nécessaire au cœur d'un surrégénérateur de puissance équivalente. Le cœur est constitué d'éléments fissiles : uranium très enrichi ou plutonium. L'emploi de l'uranium très enrichi pose des problèmes de disponibilité et d'enrichissement.

Le fonctionnement requiert des éléments fertiles (uranium appauvri ou éventuellement thorium) en quantité importante et il peut se poser un problème de capacité maximale.

Il ne semble pas, de plus, que le problème du retraitement soit entièrement résolu. Cependant, il y va de l'utilisation de l'uranium appauvri sortant des usines d'enrichissement au retraitement des combustibles du cœur des surrégénérateurs en passant par le traitement et le recyclage de l'uranium et du plutonium contenu dans les barres de combustibles irradiés, car le plutonium peut être réutilisé (recyclé) également dans les piles à neutrons thermiques.

Au niveau de l'enrichissement, les usines américaines construites pour la Défense constituaient un potentiel considérable par rapport aux besoins eux-mêmes limités. La percée du réacteur nucléaire à eau ordinaire a fait que la situation est très différente de nos jours. Le projet « Eurodif » permettra à l'Europe d'avoir une certaine sécurité dans ses approvisionnements, mais temporairement les États-Unis peuvent retarder leur livraison d'uranium enrichi pour des raisons de concurrence.

De plus, ces achats sont assortis de conditions commerciales très contraignantes : versement important à la commande, révision semestrielle des barèmes, nécessité de s'engager 8 ans à l'avance et pour une durée d'une dizaine d'années de fonctionnement d'une centrale nucléaire déterminée.

A ces contraintes techniques s'ajoutent d'autres facteurs susceptibles de retarder la mise en œuvre des programmes nucléaires :

— les obstacles financiers sont considérables ; étant donné l'ampleur des programmes, tout retard se traduira par des charges importantes à cause des intérêts intercalaires ;

— les difficultés, pour trouver des sites où implanter des centrales, risquent d'être sérieuses, étant donné la sensibilisation du public à la protection de l'environnement : pollution thermique, problème de stockage des déchets radio-actifs, risques divers (malgré le rapport Rasmussen), etc. ;

— le désir des puissances nucléaires d'empêcher la production d'armes nucléaires au départ de combustibles fournis dans le cadre du nucléaire pacifique créera des tensions politiques et des retards difficiles à évaluer.

Le traitement des minerais

La faiblesse des teneurs en uranium dans les minerais implique que l'on fasse un premier traitement afin d'assurer le transport de l'uranium dans des conditions économiquement acceptables.

C'est le traitement chimique du minerai qui est le plus employé, contrairement aux autres minerais de base que l'on sépare par gravimétrie et flottation. A partir du minerai, on élabore soit le métal, soit des sels au degré de pureté exigé pour l'alimentation des réacteurs.

Le traitement qui s'effectue à proximité des mines conduit à la fabrication d'un concentré intermédiaire qui peut titrer de 600 à 700 kilogrammes d'uranium par tonne lorsqu'il s'agit d'un *uranate de magnésie* ou de 400 kg/t lorsqu'il s'agit de *nitrate d'uranyle*. L'effet de concentration est en moyenne de 300 mais varie suivant les minerais de 100 à 2 000.

● *Broyage et concassage*

Après broyage et concassage, qui se font avec addition d'eau et selon un schéma classique, on procède à l'attaque par l'acide sulfurique de la pulpe ainsi préparée.

La *pulpe*, épaissie pour diminuer la consommation de réactif, est attaquée par l'acide sulfurique et un oxydant (chlorate de sodium) à environ 70 °C. L'uranium passe en solution sous forme de sulfate d'uranyle.

• *Lavage*

Puis, on procède à un lavage à contre-courant, dans des épaisseurs, pour éliminer sables et fines stériles. En définitive, on obtient une solution de sulfate d'uranyle titrant 300 à 500 milligrammes par litre.

• *Purification*

A partir de ce stade, il existe plusieurs méthodes pour éliminer les impuretés (silice, fer, alumine, etc.) et passer au stade de concentré final (uranate de magnésie ou nitrate d'uranyle).

On peut utiliser des résines échangeuses d'ion, fixant sélectivement l'uranium sous forme d'un complexe d'uranyle sulfaté. Par réextraction avec une solution d'acide sulfurique et de chlorure de sodium, on obtient une liqueur. En ajoutant de la chaux, on élimine le sulfate de chaux, puis, de la magnésie, on provoque la formation d'uranate de magnésie. Celui-ci, lavé, filtré et séché, a une teneur de 70 à 72 % en uranium.

La purification peut se faire suivant le même schéma général, mais en remplaçant les résines par des solvants, donc en phase entièrement liquide.

Une autre technique consiste à faire précipiter, après le lavage, un uranate de chaux qui est filtré, séché et repris à l'acide sulfurique ; l'adjonction de nitrate de chaux permet d'éliminer le sulfate de calcium et de passer au nitrate d'uranyle que l'on purifie par passage sur du tributylphosphate. La réextraction se fait à l'eau. On concentre ensuite par évaporation jusqu'à des teneurs de 400 g/l. Le concentré ainsi obtenu est plus pur que l'uranate de magnésie.

Bien sûr, il existe d'autres procédés : attaque carbonatée, électrolyse, etc., que nous ne décrirons pas ici.

La fabrication de l'uranium

A partir des concentrés d'uranium, on effectue une autre purification plus poussée pour obtenir « la pureté nucléaire ». Puis on élaborera le métal ou de l'hexafluorure pour alimenter les usines de diffusion gazeuse.

• *Purification poussée*

La purification poussée fait appel à la propriété du nitrate d'uranyle de se dissoudre dans certains solvants organiques, ce qui permet une séparation efficace de presque tous les autres éléments. On repassera, après extraction, aux solvants en phase solide par précipitation à l'ammoniac.

L'uranate d'ammonium obtenu est ensuite calciné à 400 °C dans un four continu à bande ; on obtient l'UO_3 sous forme d'écailles oranges.

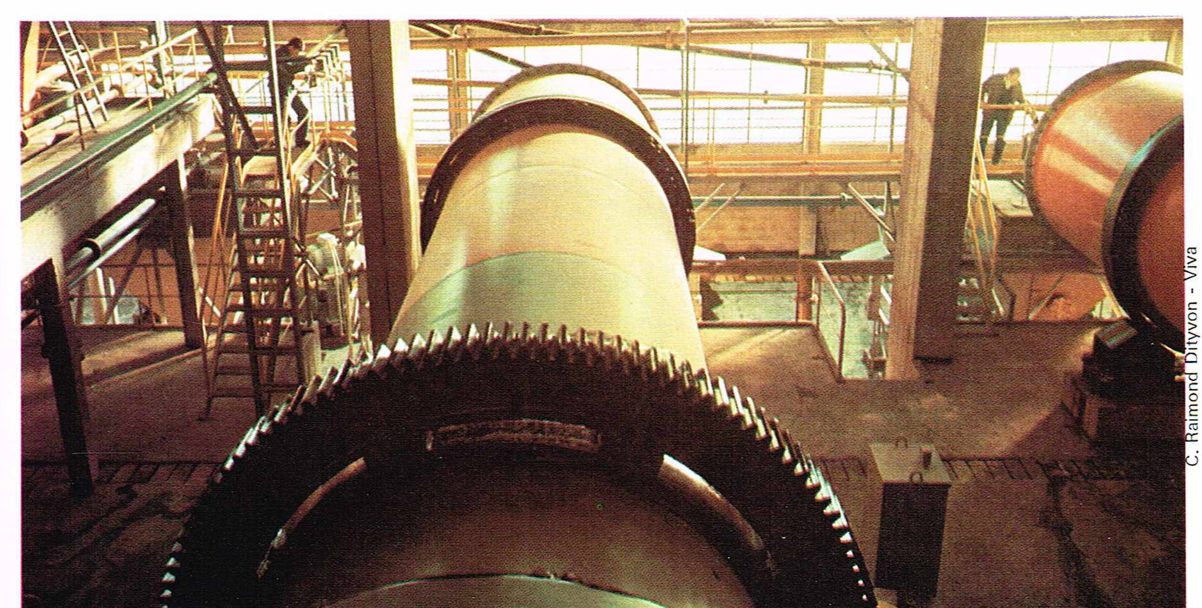
Pour élaborer l'uranium métallique, on fabrique du tétrafluorure UF_4 très pur (98 % en UF_4). Cette préparation s'effectue dans un four qui fonctionne suivant la technique du *lit mobile*. L'agent de réduction est l'ammoniac gazeux, celui de fluoration est l'acide fluorhydrique. Cette grande pureté est nécessaire à la phase suivante de réduction en métal ou à celle de transformation en hexafluorure.

• *Réduction*

La réduction du tétrafluorure d'uranium se fait par *magnésiothermie*, le magnésium étant beaucoup moins cher que le calcium nucléairement pur. La réaction se fait à 650 °C dans un four électrique à cloche qui vient coiffer le creuset.

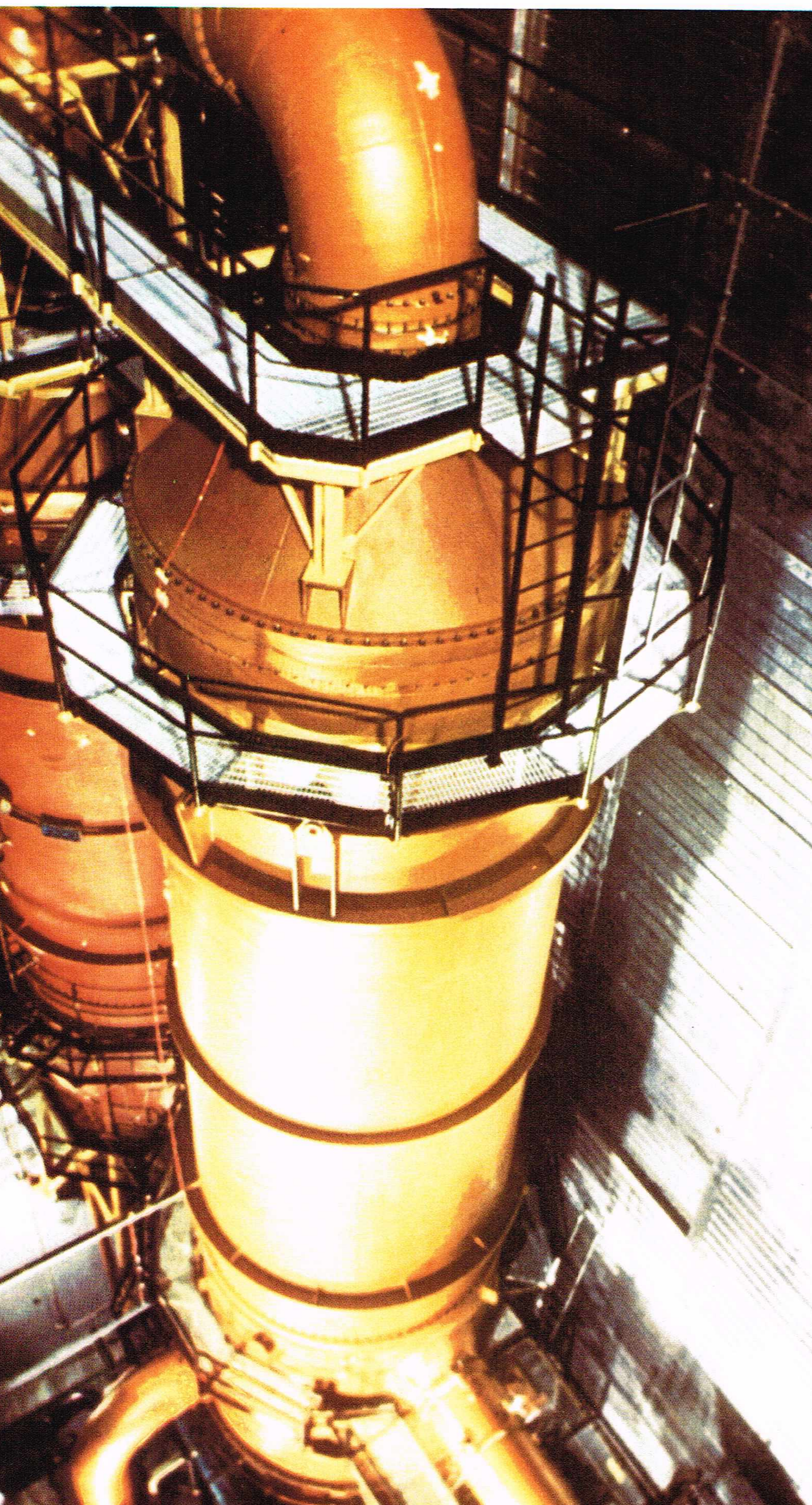
Service documentation CEA

▲ L'élaboration de l'uranium métallique passe par la réduction du tétrafluorure d'uranium par magnésiothermie Ce traitement s'effectue à 650 °C dans un four électrique qui vient coiffer le creuset.



C. Raimond Dityvon - Viva

◄ Ici à Bessines, le traitement chimique du minerai, extrait à la Crouzille, conduit à la fabrication des concentrés intermédiaires.


Service Documentation CEA

● *Fluoration*

La réaction de fluoration pour passer du tétrafluorure à l'hexafluorure se fait dans un réacteur à flamme alimenté en UF_4 broyé et en fluor préchauffé à 250-300 °C.

L'enrichissement de l'uranium

La séparation d'isotopes d'un même élément est une opération difficile parce qu'ils ont les mêmes propriétés chimiques et des propriétés physiques qui ne diffèrent que par la masse. Pour l'uranium, le problème est spécialement ardu puisque l'écart des masses (235 et 238) est à peine supérieur à 1 %.

Pour accroître la mobilité relative des molécules, il faut choisir un composé gazeux. L'hexafluorure UF_6 est stable et gazeux à 56 °C à la pression atmosphérique. Heureusement, il n'existe qu'un isotope naturel du fluor (masse 19).

Les usines à grande capacité utilisent le *procédé de diffusion gazeuse*. Lorsque l'on fait passer un mélange de deux gaz de masse différente à travers une paroi poreuse, le plus léger diffuse le plus vite. Le rapport des vitesses est égal à celui des racines carrées des masses moléculaires, soit, dans le cas de $^{235}UF_6$ et $^{238}UF_6$, égal à 1,004 3 seulement. Il faut donc faire circuler les gaz à travers un grand nombre de parois poreuses pour qu'il y ait modification notable de la teneur isotopique du gaz. Les produits sont dits « enrichis » ou « appauvris ». Les problèmes technologiques sont très aigus en raison de l'extrême réactivité de l'hexafluorure avec les composés hydrogénés.

Pour être efficaces, les pores des barrières doivent être inférieurs à 2 angströms et très nombreux (1 milliard par centimètre carré). La barrière doit être fine mais résistante à la différence de pression, à la corrosion des gaz, etc.

Les usines sont de grande taille, à cause du grand nombre d'étages nécessaires (4 000), et consomment beaucoup d'énergie pour les compresseurs.

Les usines ont surtout été construites pour des usages militaires (États-Unis, U. R. S. S., Grande-Bretagne, France, Chine). Avec le projet Eurodif, l'Europe s'est dotée d'une capacité civile internationale installée sur le site de Tricastin qui jouxte l'autre site de Pierrelatte.

L'autre procédé actuellement développé repose sur l'*ultracentrifugation*.

Le retraitement de l'uranium

Le retraitement est l'ensemble des opérations consistant à récupérer, dans les combustibles irradiés dans les réacteurs nucléaires, l'uranium et le plutonium qui y sont contenus, après les avoir séparés des produits de fission. Pour être recyclés, l'uranium et le plutonium récupérés doivent être obtenus avec une très grande pureté.

Les résidus sont stockés et confinés dans des récipients étanches après que les solutions aient été concentrées au maximum pour réduire le volume. Certains éléments des déchets ont des périodes longues, parfois plusieurs dizaines d'années. On étudie le stockage sous forme solide par évaporation et calcination en poussant le chauffage jusqu'à la vitrification des résidus. Ces derniers sont insolubles et les risques de contamination sont de beaucoup limités.

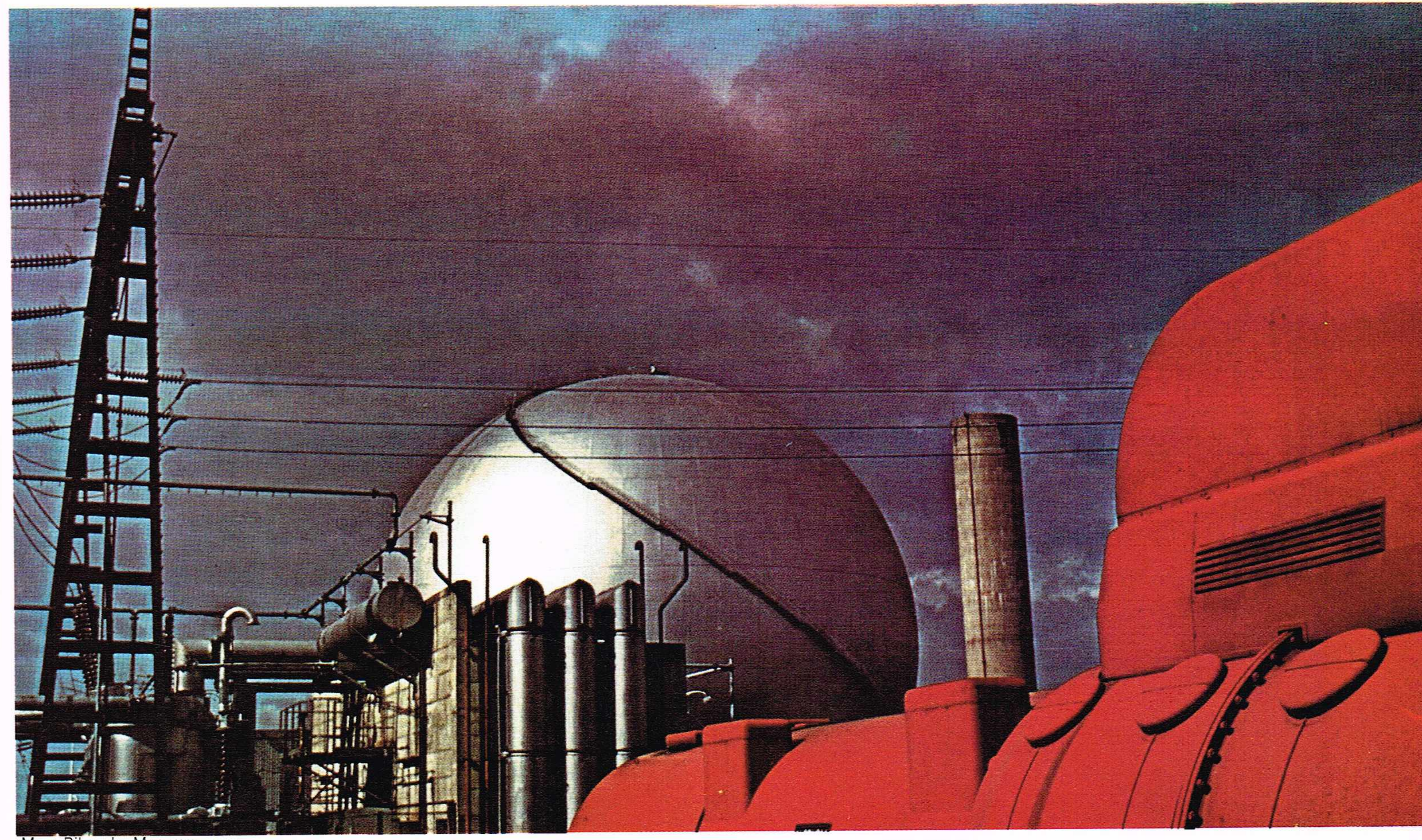
Les filières

Les différentes filières

Filière des réacteurs modérés au graphite et refroidis par un gaz

L'utilisation possible de l'*uranium naturel* comme combustible et d'un modérateur relativement facile à fabriquer à l'échelle industrielle explique le développement de ces réacteurs qui furent, au départ, utilisés pour la fabrication du plutonium à des fins militaires. La Grande-Bretagne et la France optèrent pour le refroidissement par un gaz (gaz carbonique sous forte pression), alors que les États-Unis utilisaient le refroidissement à eau.

La puissance par unité de masse de combustible (puissance spécifique) n'est pas très élevée, d'une part, parce que l'uranium métallique et sa gaine de magnésium


Marc Riboud - Magnum

▲ **Chinon,** ***mise en service en 1967, appartient à la filière des réacteurs modérés au graphite et refroidis au gaz, et utilise de l'uranium naturel.***

ne supportent pas des températures trop élevées, d'autre part, parce que la faible réactivité disponible ne permet pas d'accroître la surface d'échange de chaleur entre le combustible et le réfrigérant.

En dépit d'un succès technique incontestable, cette filière n'est plus poursuivie avec l'option initiale de l'emploi d'uranium naturel. Le coût des investissements est prohibitif par rapport aux filières à uranium enrichi.

En Angleterre, une filière dérivée utilisant de l'*uranium enrichi* est développée.

Une autre version est celle des *réacteurs à haute température*. Afin d'améliorer la puissance spécifique et le rendement, le gaz carbonique qui réagit avec le graphite à haute température est remplacé par de l'hélium sous pression. Le gainage métallique est supprimé et l'élément combustible est formé de petites particules d'oxyde ou de carbure d'uranium enrichi enrobées de pyrocarbone et placées dans des boîtiers en graphite.

Outre leurs avantages intrinsèques, les réacteurs à haute température permettront l'utilisation du thorium et il serait possible de réaliser un cycle direct en faisant passer directement dans la turbine les gaz qui ont traversé le cœur.

Filière des réacteurs modérés à l'eau lourde

Cette filière utilise l'*uranium naturel;* le rendement est voisin de celui des filières graphite-gaz, mais la puissance spécifique est plus élevée.

La production d'eau lourde, excellent modérateur, nécessite des usines spécialisées dont le coût n'est pas comparable avec celui des usines d'enrichissement de l'uranium. La séparation est plus facile grâce à la grande différence de masse relative des isotopes de l'hydrogène (masses 1 et 2).

Ce type de réacteur n'est développé de façon industrielle qu'au Canada. Les économies réalisées pour préparer le combustible compensent l'investissement en eau lourde et la complexité du cœur.

Des compromis ont été recherchés en utilisant de l'*uranium légèrement enrichi* et le refroidissement par l'*eau ordinaire*.

Filières des réacteurs modérés à l'eau ordinaire

Ces piles utilisent de l'*uranium enrichi* et sont plus simples et de petites dimensions.

Une première application est celle des piles laboratoires et pour irradiation.

Le type le plus connu est celui de la *pile piscine* dont l'eau sert à la fois de modérateur, de réfrigérant et de protection. Alors que l'eau de ces piles est froide, il faut produire de la vapeur sous pression pour obtenir de l'énergie utilisable.

La première application de ce type de pile fut le moteur du sous-marin *Nautilus* aux États-Unis. Pour résister à la corrosion de l'eau chaude, on n'utilise plus, dans l'alliage à base d'uranium très enrichi qui constitue les plaques de combustible des piles piscines, l'aluminium mais le zirconium.

L'eau assure à la fois le rôle de modérateur et celui de réfrigérant, mais, pour le refroidissement, deux techniques sont en compétition : celle à *eau pressurisée (P. W. R.)* et celle à *eau bouillante (B. W. R.)*.

Filière de réacteurs à neutrons rapides

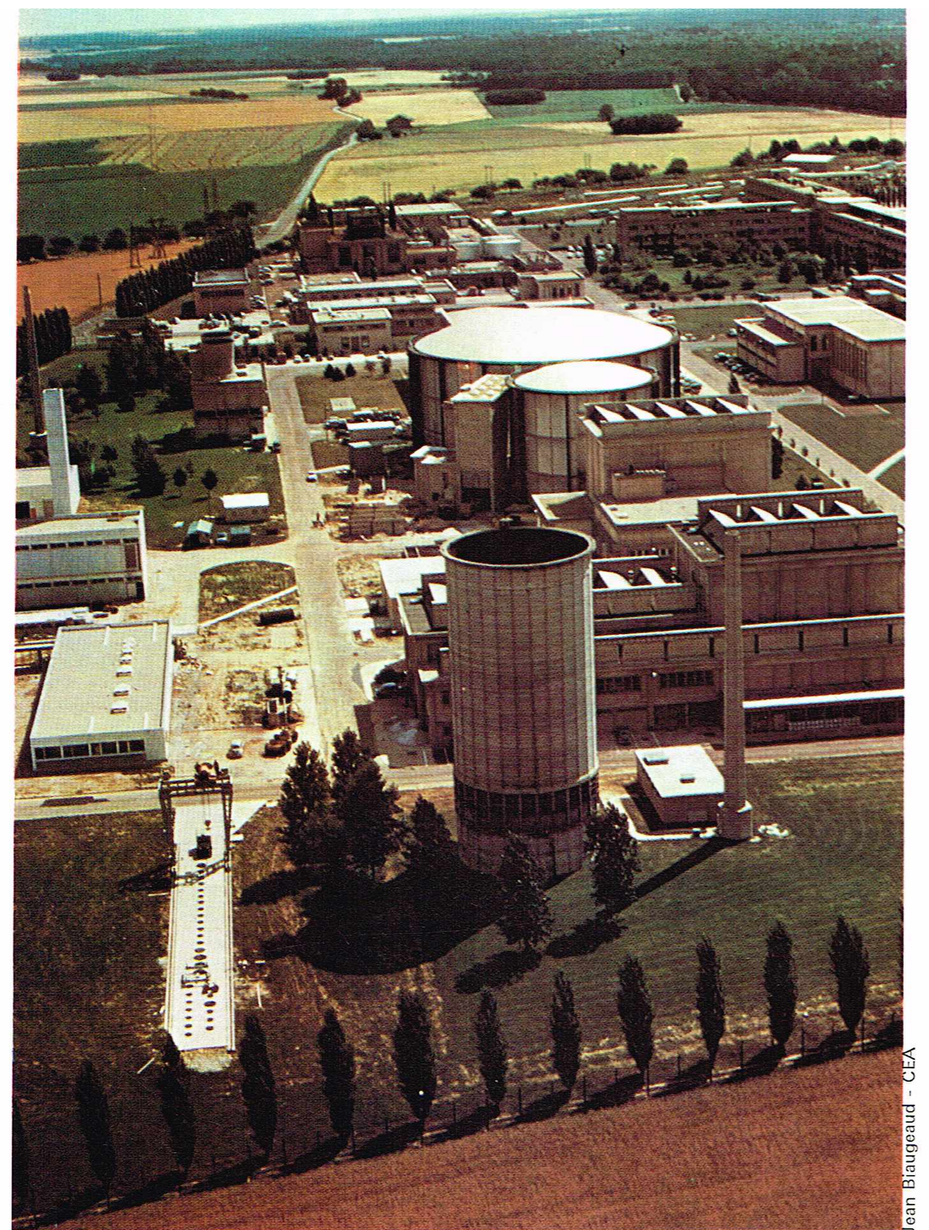
Ces réacteurs à neutrons rapides se distinguent des précédents par l'*absence de modérateur* et fonctionnent avec un combustible très enrichi comme première charge ou du plutonium. Ces réacteurs sont surrégénérateurs avec le cycle ^{238}U-^{239}Pu. Le facteur de surrégénération est de 1,1 à 1,4.

A la différence des autres filières, ces réacteurs consomment la totalité des noyaux fertiles (^{238}U). L'énergie qui peut être tirée des ressources mondiales d'uranium est ainsi considérablement augmentée. Cette filière aura donc une place privilégiée dans les développements futurs.

L'absence de modérateur permet un réacteur très compact, mais, pour extraire la chaleur, il faut une grande surface d'échange et un réfrigérant très efficace. Ce dernier ne peut être l'eau à l'état liquide qui ralentirait les neutrons, c'est le *sodium fondu* qui est généralement retenu, bien que son emploi soit très délicat.

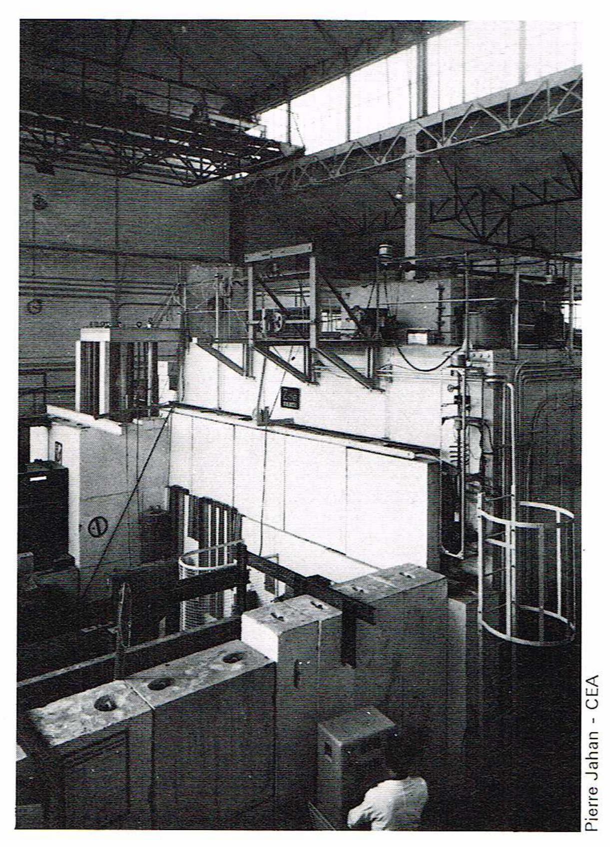
La France, avec les réacteurs Phénix et Super-Phénix, est à la pointe de la technologie en ce domaine.

◀ ***Page ci-contre, l'uranium que nous utilisons actuellement est enrichi aux États-Unis ou en Union soviétique; avec*** **Eurodif,** ***usine européenne d'enrichissement installée en France, cette dépendance tendra à disparaître à partir de 1980, date prévue de sa mise en service.***



Jean Biaugeaud - CEA

▲▶ *Les piles expérimentales, ci-dessus EL2 et EL3 à Saclay, et ci-contre, Zoé à Fontenay, n'ont pas démontré l'intérêt économique des filières à eau lourde.*



Pierre Jahan - CEA

Le choix de la filière nucléaire

Le manque de possibilité d'enrichissement a conduit la France à choisir, il y a 20 ans, une *filière à uranium naturel*. A l'époque, il ne s'agissait pas encore de fournir de l'électricité dans des proportions importantes pour assurer notre indépendance énergétique.

— L'eau ordinaire n'est pas compatible avec l'uranium naturel pour des raisons neutroniques.

— Les piles expérimentales Zoé à Fontenay, EL 2 et EL 3 à Saclay n'ont pas démontré l'intérêt économique des filières à eau lourde, de plus les difficultés d'approvisionnement en eau lourde ne sont pas un avantage quant au développement d'un programme industriel.

— L'emploi de l'hélium comme fluide de refroidissement a été envisagé mais son coût de fabrication et les difficultés techniques ont conduit à abandonner cette filière.

C'est donc vers la *filière des réacteurs modérés au graphite et refroidis par le gaz carbonique* que l'effort de la recherche s'est orienté. La voie a été ouverte, en 1956, à Marcoule, avec la mise en route des installations E. D. F. de récupération d'énergie des réacteurs du C. E. A.

Les premières tranches nucléaires ont été installées à Chinon ; c'étaient des prototypes : Chinon 1 en 1963 de 70 MW, Chinon 2 en 1965 de 210 MW, et Chinon 3 en 1967 de 480 MW.

Les centrales les plus élaborées sont celles de Saint-Laurent : Saint-Laurent 1 de 480 MW, mise en service en 1969 ; et Saint-Laurent 2 de 515 MW, mise en service en 1971.

Sur le même modèle, la centrale de Vandellos, en Espagne, à la réalisation de laquelle l'E. D. F. a participé, a été mise en service en mai 1972.

D'une conception différente en ce qui concerne les éléments combustibles, la centrale Bugey 1 a été mise en service en 1972.

Sur le plan technique, elle présente plusieurs avantages par rapport aux réacteurs modérés à l'eau ordinaire. Du point de vue de la sécurité, l'intégration de tout le circuit primaire (réacteurs, échangeurs, soufflantes, circuits de gaz carbonique) dans un caisson de béton précontraint est très intéressante pour la sûreté de l'installation vis-à-vis de l'environnement. De plus, des rejets d'effluents radio-actifs sont faibles.

En revanche, l'emploi d'un caloporteur gazeux entraîne de nombreuses sujétions, qui, si elles sont maîtrisées techniquement, compromettent cependant l'économie de la filière. La faible efficacité du fluide caloporteur exige de véhiculer des volumes très grands, et conduit donc à augmenter et à compliquer les surfaces d'échanges avec le combustible et aussi avec l'eau du circuit secondaire.

De plus, à puissance électrique égale, la masse du cœur est plus de 11 fois celle employée dans les réacteurs P. W. R. Les dimensions de cette chaudière sont donc très importantes et la construction d'usines de puissance supérieure sera très délicate.

Autre facteur désavantageux, la température de fonctionnement. Le combustible métallique se trouve dans des conditions très proches des limites technologiques de température. Il y a donc là un risque important en cas d'augmentation passagère et accidentelle de la température comme ce fut le cas à Saint-Laurent 1 en 1969. La gaine, en alliage de magnésium et de forme complexe, est fragile. De plus, ce combustible est instable à chaud en présence de gaz carbonique.

Il faut donc un système de détection de rupture de gaine. Ce système de surveillance est complexe, car, pour 500 MW, il y a quelque 3 000 canaux de combustible.

Le nombre d'éléments combustibles est très grand (45 000 pour 500 MW). Chaque année, il faut en remplacer 15 000, donc prévoir un déchargement en marche, autre facteur d'augmentation du coût et du risque. C'est la contrepartie à l'intégration dans un caisson en béton : le combustible est difficile d'accès.

L'utilisation de l'*uranium enrichi* ne présente pas les mêmes inconvénients. Le volume du combustible est fortement réduit. L'eau ordinaire sert à la fois de modérateur et de fluide caloporteur.

— L'oxyde d'uranium réfractaire est stable en présence d'eau. La température de fonctionnement est très inférieure aux limites technologiques de tenue des matériaux.



P. Koch - Rapho

◀ *L'informatique au service de la sécurité des réacteurs : ici, la salle de contrôle de la centrale canadienne* **Bruce « B ».**

Le dispositif de détection de rupture de gaine est donc très simple.

— L'eau étant un bon fluide caloporteur, les gaines des éléments combustibles sont en tubes lisses très simples et remplacent les fines ailettes qui augmentaient la surface d'échange dans la filière graphite-gaz ; il en est de même pour les faisceaux du générateur de vapeur.

— La puissance de circulation du fluide primaire est diminuée ; le rendement électrique net est meilleur (0,33 au lieu de 0,30).

— Le combustible est renouvelé à l'arrêt, réacteur ouvert et sous eau, avec un appareil de manutention extrêmement simple.

Pour parvenir à un degré de sûreté au moins égal à celui du graphite-gaz, il faut installer une enceinte supplémentaire et, d'autre part, une centrale très élaborée de traitement des effluents radio-actifs.

De plus, à énergie égale, la quantité de combustible à retraiter est 7 fois moindre dans l'eau des centrales P. W. R.

La quantité de plutonium récupérée par kg de combustible retraité est au moins trois fois plus faible pour la filière graphite-gaz.

Le développement des surrégénérateurs à partir des réacteurs graphite-gaz aurait donc nécessité des surcoûts importants.

Les Anglais ont abandonné en 1964 cette filière pour la *filière à uranium enrichi-graphite-gaz* qui n'a pas donné les résultats escomptés et se sont tournés vers les réacteurs P. W. R.

En 1969, comme la plupart des pays industriels, l'E. D. F. a décidé de construire des *centrales à eau ordinaire*.

La première tranche a été celle de Fessenheim. En 1976 Bugey 2 a été mise en service, et, en 1977, Fessenheim 2. Le programme nucléaire accéléré depuis 1974 prévoit un rythme de 7 tranches (de 900 à 1 000 MW) engagées chaque année.

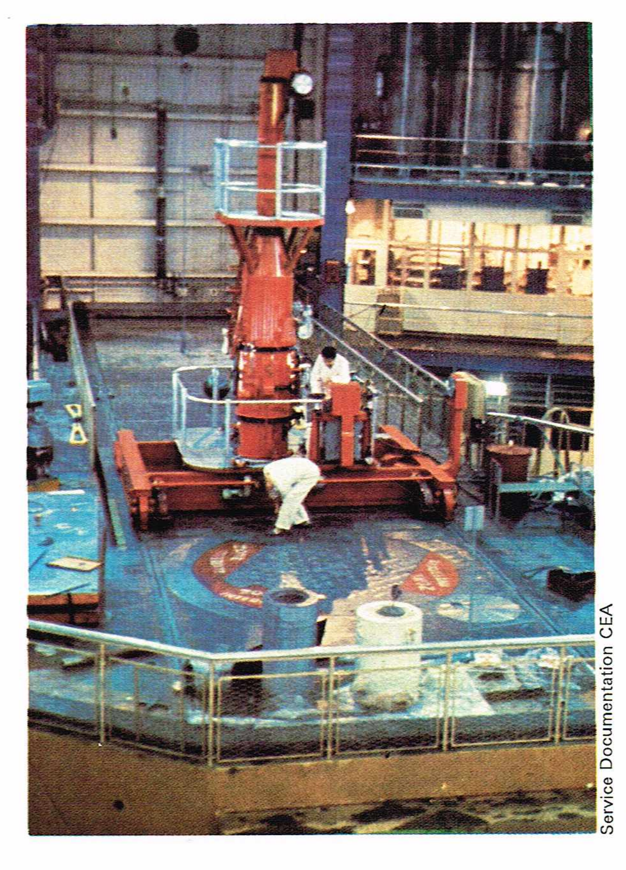
Le paiement des licences ne représente que 5 % du coût de la chaudière. Le seul pays ayant réussi à persévérer dans une filière purement nationale et à surmonter les difficultés du début est le Canada avec la filière à eau lourde.

L'adoption d'une filière largement développée présente l'avantage considérable de pouvoir bénéficier de l'expérience acquise dans les autres pays, tout en évitant les dépenses énormes d'études, d'essais de prototype, entraînées par le lancement d'une filière entièrement nouvelle.

Au 1er janvier 1976, les 49 tranches P. W. R. en exploitation dans le monde occidental (dont 31 aux États-Unis) représentaient 32,2 GW et avaient produit 461 TWh. Le nombre d'unités actuellement en construction et en commande est de 195, pour une puissance de 200 GW. Les États-Unis représentent la majeure partie de ce programme avec 122 tranches correspondant à 129 GW.

La sécurité des réacteurs

L'étude sur la sécurité des réacteurs a été effectuée sous l'égide de la Commission de l'énergie atomique des États-Unis, pour évaluer les risques que pouvait subir la population du fait d'accidents hypothétiques dans les centrales nucléaires commerciales du type actuellement utilisé. Cette étude a été effectuée sous la direction indépendante du professeur Norman C. Rasmussen du Massachusetts Institute of Technology. Les risques devaient être estimés et non mesurés, parce que, bien que plus de 50 centrales de ce genre soient actuellement en exploitation, il n'y a eu aucun accident nucléaire à ce jour. Les méthodes utilisées pour mettre au point ces estimations sont fondées sur celles qui ont été développées par le Département de la défense et l'Administration nationale de l'aéronautique et de l'espace (N. A. S. A.) au cours des dix dernières années.



Service Documentation CEA

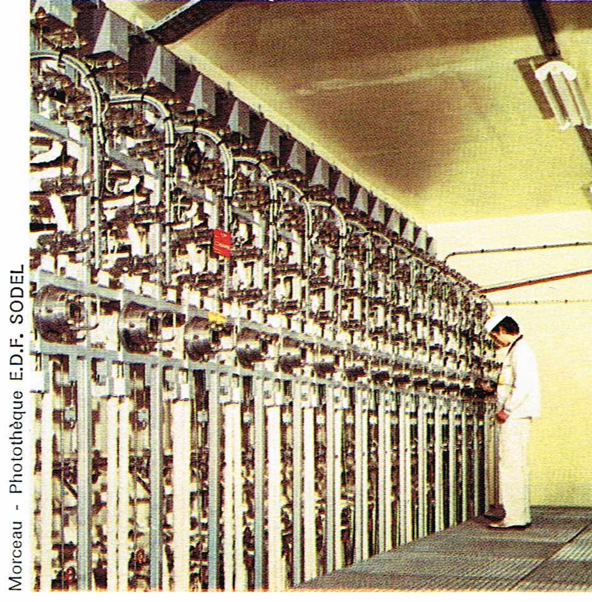
◀ *Déchargement des radio-éléments par le toit de EL3 à Saclay.*

Tableau VII

Coût de la production d'électricité (janvier 1976) en centimes de francs par kWh et en pourcentages

Coût moyen en centimes par kWh	Nucléaire P.W.R.		Fuel sans désulfuration		Fuel avec désulfuration	
Puissances	**1 300 MW**		**700 MW**		**700 MW**	
Amortissement de l'investissement de la centrale	3,66	50,1 %	2,41	20,6 %	2,41	18,9 %
Frais d'exploitation et d'entretien	1,49	20,4 %	1,49	12,7 %	1,49	11,6 %
Frais de combustible	2,15	29,5 %	7,80	66,7 %	8,90	69,5 %
Coût moyen total	7,30	100 %	11,70	100 %	12,80	100 %

▲ *Tableau VII : pourcentages et coûts de la production d'électricité en centimes de francs en kWh (janvier 1976).*



▶ *Système de détection de rupture de gaine équipant la centrale nucléaire de Bugey.*

Morceau - Photothèque E.D.F. SODEL

▼ *Tableau VIII : décomposition du coût du combustible dans le cas de l'utilisation de l'uranium (E. D. F., janvier 1976).*

Tableau VIII

Décomposition du coût du combustible uranium, en centimes de francs par kWh (E.D.F., janvier 1976)

Achat de l'uranium naturel à 15 $/lb U_3O_8	1,03
Transformation de l'U en UF_6	0,06
Enrichissement en ^{235}U	0,85
Fabrication et transport	0,28
Retraitement et stockage des déchets	0,30
Récupération des matières nucléaires résiduelles dans le combustible usé (^{235}U, ^{238}U et Pu)	(— 0,41)
Total	2,11
Porté à 2,15 en 1985 (prix de l'U)	

L'objectif de l'étude était de faire une estimation réaliste de ces risques, et de les comparer aux risques non nucléaires auxquels la population et chaque personne en particulier sont déjà exposées. Ces informations devraient être d'une grande assistance pour déterminer l'utilisation future de l'énergie nucléaire en tant que source d'électricité.

La conclusion fondamentale de cette étude est que les risques causés au public du fait d'accidents potentiels dans les centrales nucléaires sont extrêmement faibles. Cette supposition est fondée sur les considérations suivantes.

— Les conséquences des accidents hypothétiques de réacteurs ne sont pas plus importantes, et, dans beaucoup de cas, sont beaucoup plus faibles que celles des accidents non nucléaires. Ces conséquences sont plus faibles que celles que des études précédentes, qui avaient délibérément surestimé les risques, laissaient supposer.

— La probabilité pour que se produisent des accidents de réacteurs est beaucoup plus faible que celle des accidents non nucléaires ayant des conséquences similaires. Tous les accidents non nucléaires examinés dans la présente étude, parmi lesquels les incendies, les explosions, les dégagements de produits chimiques toxiques, les ruptures de barrages, les chutes d'aéronefs, les tremblements de terre, les ouragans et les tornades, ont beaucoup plus de chances de se produire, et peuvent avoir des conséquences comparables ou supérieures à celles des accidents nucléaires.

Cependant cette étude ne suffit pas à diminuer l'impact psychologique sur la population de tout incident dans une centrale nucléaire. Récemment, nous avons pu constater qu'un incident mineur, dans une centrale nucléaire aux États-Unis, n'ayant entraîné aucune contamination, car il s'est produit en dehors de l'enceinte de sécurité, a eu les honneurs de la presse jusqu'en Europe. Il est à parier qu'un incident du même type, ou plus grave, dans une autre industrie n'aurait été mentionné que dans les journaux locaux.

Les données économiques sur l'utilisation de l'énergie nucléaire

Le coût de la production d'électricité

Sur le *tableau* VII sont comparés les coûts de production de l'électricité par les centrales nucléaires ou par les centrales à fuel (en janvier 1976).

Les puissances des centrales retenues pour la comparaison correspondent aux puissances optimales compatibles avec le réseau français en 1985. L'avantage économique du nucléaire en ce qui concerne la production d'électricité ne peut être contesté à ce niveau. Cependant, le problème est différent si l'on place la substitution au niveau de la consommation finale, car, pour l'instant, le transport de l'énergie électrique est très onéreux. Les techniques du transport à très haute tension ou par câbles supra-conducteurs qui devraient permettre de réduire ce poste sont encore loin d'être disponibles industriellement.

La part du combustible est d'environ 30 % pour le nucléaire contre plus des 2/3 pour les centrales thermiques. Du point de vue de ressources et des réserves d'uranium, l'industrie nucléaire a donc là un avantage.

La décomposition du coût du combustible

Le *tableau* VIII indique la décomposition du coût du combustible dans le cas de l'utilisation de l'uranium.

L'achat de l'uranium naturel représente donc 14,6 % du coût du kWh nucléaire pour un réacteur P. W. R. de 1 300 MW. Une augmentation du coût de l'extraction semble donc supportable, on augmenterait ainsi considérablement les réserves.

La contrepartie en est que les charges d'investissement sont de l'ordre du double de celles du thermique. De plus, comme il s'agit de technologies nouvelles, l'inflation sur ces charges est très grande : la hausse est de 125 % en 5 ans.

Tout retard d'origine technique lors de l'installation des usines se traduit par le jeu des intérêts intercalaires par des charges financières importantes.

Les réserves mondiales

Les considérations développées dans les chapitres précédents montrent combien la précision des chiffres avancés pour l'estimation des réserves prouvées est incertaine.

Aucune énergie renouvelable n'est encore utilisable sur une échelle suffisante pour la satisfaction des besoins mondiaux; ceux-ci ne peuvent être couverts que par des ressources épuisables.

Les besoins à court et à moyen terme (20 à 30 ans) seront-ils satisfaits et la poursuite de l'expansion garantie? Les réserves ultimes récupérables permettent-elles, à long terme, un relai progressif par une ou des énergies renouvelables?

Faisons tout d'abord un tour d'horizon et une comparaison entre les divers types de réserves pour chaque énergie. Nous n'avons retenu que la distinction entre réserves prouvées, donc récupérables, aux conditions économiques actuelles, et réserves ultimes pour la couverture des besoins à long terme (*fig.* 5).

Les divergences d'un auteur à l'autre, et parfois même les contradictions d'une année à la suivante, nous incitent à la prudence. C'est pourquoi, au niveau des réserves ultimes, nous donnons une fourchette entre les estimations les plus pessimistes et les plus optimistes.

Dans le cas du charbon, l'énormité des réserves prouvées rend cette distinction inutile.

Pour les réserves d'uranium, la mise au point des réacteurs surrégénérateurs transforme le problème de ressources limitées en un problème de capacité maximale installable. Dans ce cas, il nous est apparu inutile de parler de réserves ultimes.

L'état de développement des techniques d'exploitation des sables et des schistes bitumineux ne nous permet pas de les ranger, ne serait-ce qu'en partie, dans les réserves prouvées. Il n'est pas du tout évident que les résultats prometteurs de certaines exploitations pilotes soient applicables à tous les gisements mis en évidence. Les incertitudes quant au taux de récupération sont encore trop grandes pour avancer des chiffres au niveau mondial.

A la vue de ce graphique (*fig.* 5), il apparaît qu'une énergie a un poids considérable : le charbon.

D'un point de vue global, la réponse aux questions que nous avons formulées quant à la couverture des besoins ne peut qu'être affirmative. En fait, il s'agit là d'un faux problème. C'est au niveau des substitutions et des concurrences énergétiques que l'on doit se poser cette question.

Les possibilités d'utilisation et de développement de telles ou telles ressources sont-elles fonction des réserves tant prouvées que potentielles?

Le charbon, qui a permis le développement industriel, a été progressivement remplacé par les hydrocarbures parce que ceux-ci étaient produits à des coûts nettement inférieurs, et le fait que les réserves soient nettement supérieures à celles des combustibles liquides ou gazeux n'a eu aucune influence.

Le nucléaire, avant de démarrer réellement et d'avoir des perspectives de développement très importantes, a dû attendre les crises pétrolières de 1970-1974, donc le moment où son prix de revient est en fait devenu nettement compétitif.

Cependant n'oublions pas que l'essentiel du prix de revient du pétrole est représenté par la fiscalité. Il y a là un moyen de pression énorme pour contrecarrer le développement des autres ressources.

Pour pouvoir jouer un rôle important dans la substitution énergétique, une réserve doit simplement couvrir une part suffisante des besoins sur une longue période. Il y a donc un certain seuil de réserves qu'une ressource naturelle doit posséder pour jouer un rôle au niveau mondial.

Toutes les ressources naturelles satisfont à ce critère. Au-dessus de ce seuil, la notion de réserve est accessoire et les estimations n'ont pas besoin d'être précises. Il s'agit donc d'un problème économique et surtout politique.

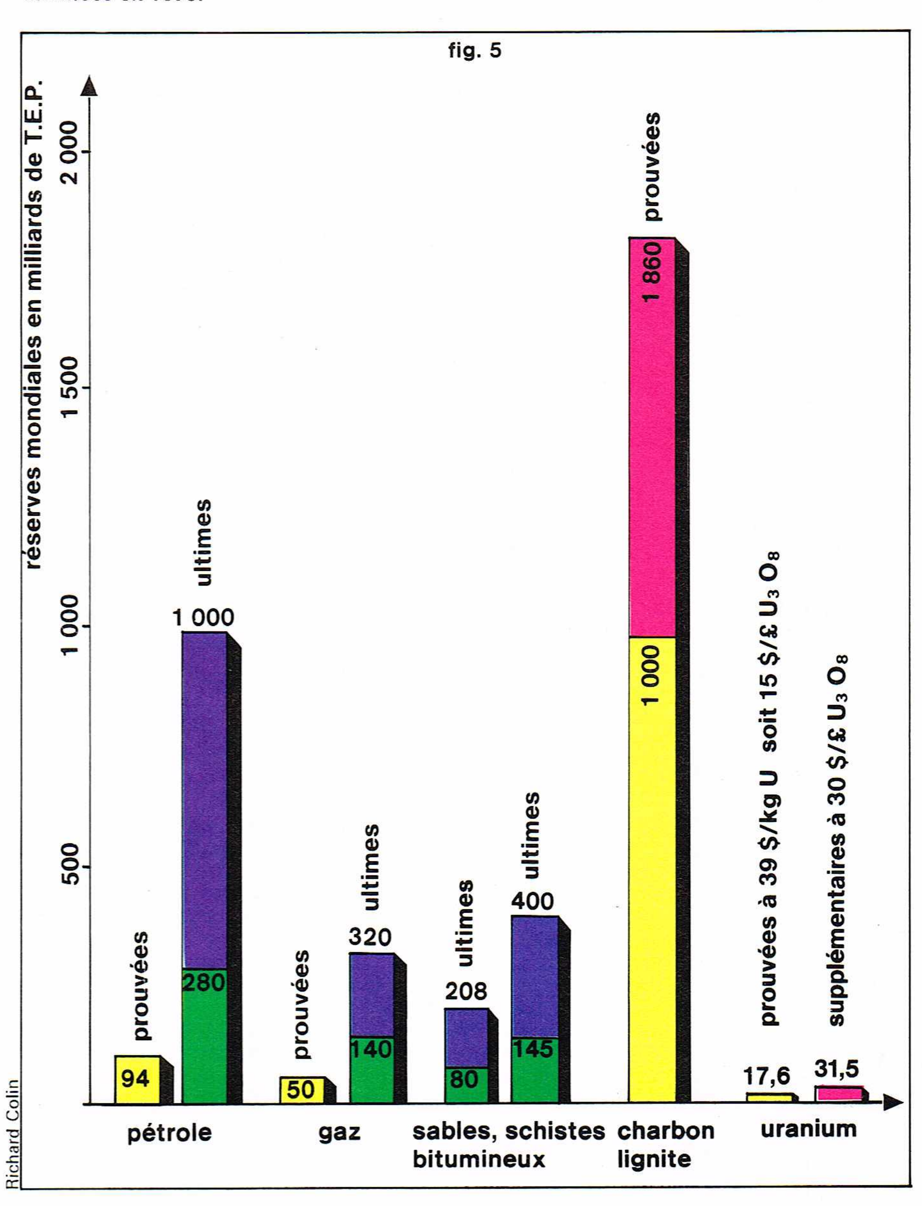
Au niveau du pétrole, nous avons vu que le manque de diversification géographique des réserves concentrées pour 57 % au Moyen-Orient a entraîné la crise que nous connaissons. Il est donc capital de trouver de nouvelles zones de production pour diminuer la dépendance vis-à-vis des producteurs, ou par substitution diminuer notre



Bruno Barbey - Magnum

▲ *57% des réserves pétrolières sont concentrées au Moyen-Orient; ici, le port pétrolier de Kharg, île des côtes de l'Iran sur le golfe Persique, exporte quotidiennement 5 millions de barils de pétrole brut.*

▼ *Figure 5 : diagramme des réserves mondiales d'énergie, en milliards de T. E. P., estimées en 1975.*



Richard Colin

Tableau IX Estimation des réserves prouvées de pétrole au 1er janvier 1976 et ratio réserves/production					
Régions	**Réserves totales (terre + mer)**		**dont réserves en mer**		**Ratio réserves/ production**
	en millions de tonnes	**en %**	**en millions de tonnes**	**en %**	
Amérique du Nord	5 800	6,0	1 100	5,0	10,5
Amérique centrale et Amérique du Sud	5 100	5,5	2 200	10,0	23
Afrique	8 700	9,5	1 200	5,5	38,5
Moyen-Orient	53 200	57,0	13 000	60,0	54
Asie - Océanie	3 000	3,0	1 100	5,0	28,5
Europe occidentale	3 600	3,5	2 800	13,0	15
Monde non socialiste	79 400	84,5	21 400	98,5	37,5
Pays socialistes	14 700	15,5	300	1,5	25
Monde entier	94 100	100,0	21 700	100,0	35

▲ ***Tableau IX :** estimations des réserves prouvées de pétrole au 1er janvier 1976, et ratio réserves/production.*

consommation de pétrole par un effort délibéré de développement d'une autre énergie. C'est le cas pour le nucléaire en France.

Pour juger des possibilités réelles de diversification, deux facteurs sont importants :

— le ratio réserves/production ;

— l'appréciation des possibilités de renouvellement des réserves (*tabl.* IX).

Or, la découverte d'une nouvelle zone pétrolière importante reste un phénomène quasi imprévisible. Seules des indications de base peuvent être avancées à propos du potentiel que représentent les zones off-shore inexploitées.

La part de l'off-shore dans les réserves prouvées mondiales s'établit à 23 %. Au niveau du monde non socialiste, elle atteint 27 %.

A l'échelle mondiale, ce ratio se maintient aux alentours d'une trentaine d'années de production courante malgré le développement de la consommation (*tabl.* IX).

Au niveau régional, les écarts entre les différentes estimations et leur variation dans le temps empêchent toute conclusion simple.

La seule zone où le ratio réserves/production semble orienté à la hausse en longue période est l'Amérique du Sud. Cette évolution n'est pas imputable à des mesures de conservation puisque la production n'a cessé de croître, mais bien à la découverte de nouvelles réserves, principalement en Équateur et plus récemment au Mexique.

Partout dans les autres pays producteurs, la tendance était à la baisse jusqu'en 1973, et s'est inversée depuis.

En conclusion, les estimations de réserves semblent surtout utiles au niveau global, car elles permettent de supprimer toute crainte de pénurie, soit pour l'ensemble des sources existantes, soit pour chacune d'entre elles.

Les **coûts de production** sont un facteur important quant à la concurrence énergétique. Pour pouvoir les comparer, il faut se ramener à une unité équivalente, ici la *thermie,* ce qui pose le problème des coefficients de conversion et de la valeur des produits énergétiques que nous aborderons plus loin.

Le **montant des investissements** est également très important, car il rend compte des difficultés de mise en œuvre et pose le problème des disponibilités financières.

Étant donné la diversité du coût de production pour les raisons déjà exposées, nous ne donnerons ici que des fourchettes fixant simplement l'ordre de grandeur. Ces chiffres ne doivent donc pas être considérés comme absolus et précis, il s'agit d'estimations.

Il ressort de l'étude du *tableau* X que le pétrole présente un avantage très net. Pour les pays producteurs (Afrique, Moyen-Orient), le coût est inférieur à 1 centime de franc par thermie. Ce coût n'est atteint que dans les cas défavorables de production en mer.

Seul le gaz produit aux États-Unis et en Europe, à partir de champs situés à terre, et les mines de charbon nord-américaines exploitées à ciel ouvert représentent des substituts possibles du point de vue des coûts de production.

Les coûts du gaz et du charbon sont, par contre, comparables à ceux du pétrole produit dans les zones de consommation. La diversification des sources d'approvisionnement peut donc se faire en utilisant les substitutions énergétiques, si l'on ne retient que ce critère.

Les schistes et sables bitumineux semblent, pour l'instant, n'être que faiblement compétitifs.

Tableau X Coûts de production des différentes sources d'énergie fossiles en centimes de francs par thermie		
Énergie	**Coûts de production**	
	valeurs inférieures	valeurs supérieures
Pétrole		
Moyen-Orient		
— à terre		
. ancien	0,06	0,12
. récent	0,15	0,35
— en mer		
. grands champs	0,20	0,35
. petits champs	0,50	0,70
Afrique		
— Libye (à terre)	0,15	0,5
— Algérie	0,5	0,7
— en mer	0,5	1,0
États-Unis		
— à terre	0,5	1
— en mer	1	1,7
— Alaska	1,5	2,4
Europe - mer du Nord		
— Zone nord	1,5	2,4
— Zone sud	0,9	1,4
Gaz		
États-Unis	0,4	1,5
Europe		
— à terre	0,25	0,7
— en mer du Nord		
. loin des côtes	1,2	2
. proche des côtes	0,5	0,9
Huiles lourdes		
États-Unis	1,7	3
Sables bitumineux	2,4	2,4
Schistes bitumineux	2,7	5
Charbon		
États-Unis		
— ciel ouvert	0,5	0,7
— mines souterraines	2	3
— moyenne	1,2	2
Europe	1,7	4
France	2,4	2,7

▶ ***Tableau X :** coûts de production des différentes sources d'énergie fossiles en centimes de francs par thermie (c/th).*

Par contre, les investissements nécessaires au développement des ressources énergétiques dans les pays consommateurs sont très importants (*tabl.* XI).

Là, la concurrence est beaucoup plus discutable. Les gains réalisés sur le transport ne compensent pas l'avantage sur les frais fixes que détient la production du pétrole du Moyen-Orient. Il s'agit là d'un choix politique pour assurer la sécurité des approvisionnements que les pays consommateurs sont amenés à faire.

Notons que nous avons raisonné en terme de *coûts* et non de *prix*. C'est-à-dire que nous n'avons pas tenu compte de la fiscalité des divers pays. Pour les pays de l'O. P. E. P., la fiscalité représente plus de 95 % du prix. Dans ces conditions, les récents événements pétroliers permettent, grâce à l'augmentation énorme des prix, de développer des ressources énergétiques dont l'intérêt était discutable.

Tableau XII
Pouvoirs calorifiques supérieurs et inférieurs en kcal/kg (Durier : Caractéristiques des carburants et combustibles, Technip)

Pouvoirs calorifiques \ Carburants	Essence	Pétrole	Gas-oil	Fuel domestique	Fuel léger	Fuel lourd n° 1	Fuel lourd n° 2
Supérieurs	11 200	10 950	10 850	10 750	10 600	10 450	10 350
Inférieurs	10 500	10 300	10 200	10 100	10 100	9 850	9 750

▲ ***Tableau XII :*** ***tableau comparatif des pouvoirs calorifiques supérieurs et inférieurs, en kcal/kg, pour différents carburants et combustibles.***

Tableau XI
Investissements des différentes sources d'énergie fossiles en francs par tonne-équivalent pétrole et par an

Énergie	Investissements valeurs inférieures	Investissements valeurs supérieures
Pétrole		
Moyen-Orient		
— à terre		
. ancien	20	30
. récent	50	150
— en mer		
. grands champs	80	120
. petits champs	150	250
Afrique		
— Libye (à terre)	50	250
— Algérie	200	300
— en mer	150	500
États-Unis		
— à terre	200	400
— en mer	400	800
— Alaska	800	1 200
Europe - mer du Nord		
— Zone nord	800	1 200
— Zone sud	350	500
Gaz		
États-Unis	200	800
Europe		
— à terre	100	300
— en mer du Nord		
. loin des côtes	800	1 200
. proche des côtes	200	350
Huiles lourdes		
États-Unis	600	1 200
Sables bitumineux	800	1 200
Schistes bitumineux	1 000	2 000
Charbon		
États-Unis		
— ciel ouvert	250	500
— mines souterraines	600	800
— moyenne	500	700
Europe	500	1 000
France	600	700

◀ ***Tableau XI :*** ***investissements des différentes sources d'énergie fossiles, en francs par tonne-équivalent pétrole et par an (F/T. E. P./an).***

Valeur des produits énergétiques

Pour le physicien, l'énergie est « quelque chose » qui se transforme (matière, rayonnement, travail, chaleur, etc.).

Pour l'économiste, il s'agit d'un bien dont l'utilité sociale ne peut s'appréhender uniquement par une grandeur physique. Les produits énergétiques ont une valeur qui est fonction de leurs utilisations, de la structure des moyens de distribution, du développement de la technologie, des substitutions possibles entre produits, etc.

Certes, on peut dire que dans chaque produit disponible sur le marché lors de son élaboration, on a incorporé, ou mieux investi, une certaine quantité d'énergie. Ceci est également vrai pour les produits énergétiques. On pourrait donc être tenté de se livrer à des **bilans énergétiques actualisés.** Cette étude, à elle seule, serait très imparfaite, car elle ignorerait l'utilisation que l'on fait de ces produits. Un même produit peut avoir des prix différents selon sa destination.

Partant du principe que les produits énergétiques actuels font partie de notre niveau de vie et que nous ne pouvons modifier brutalement l'utilisation que nous en faisons, essayons cependant de dégager quelques caractéristiques de ces produits. Auparavant, rappelons qu'en matière de concurrence énergétique, d'une manière générale, les facteurs importants sont :

— les coûts de production et, partant, l'estimation des réserves géologiques récupérables (pour les énergies fossiles) ;
— les coûts de transformation et de distribution ;
— la sécurité dans les approvisionnements ;
— les délais de mise en œuvre, compte tenu de l'environnement économique et technologique ;
— l'utilisation que l'on fait des divers produits.

Revenons sur ce dernier point qui, à nos yeux, est très important pour l'étude de la concurrence énergétique sur un marché donné.

Prenons l'exemple des carburants automobiles et des fuels. Le seul pouvoir calorifique qui caractérise l'énergie interne d'un combustible ne peut rendre compte de la valeur du produit ; certes, celui de l'essence est le plus élevé (*tabl.* XII).

Pour obtenir l'essence, il faut investir une quantité d'énergie plus grande ; par exemple, un réformage catalytique consomme 100 kg de fuel par tonne de charge et un craquage environ 70 kg, qui sont finalement transformés en énergie chimique.

Pour les produits pétroliers, on peut faire le **bilan moyen de l'énergie investie dans chaque produit,** en fonction des divers schémas de raffinage, des rendements des unités de traitement et éventuellement compter l'énergie incorporée dans les installations des unités (celle-ci est déjà comptabilisée dans le prix des matériaux).

Cependant, un naphta, un fuel peuvent être brûlés, transformés en carburants ou en produits pétrochimiques. Il y a concurrence entre les diverses utilisations et les diverses sources d'énergie. Il n'est pas possible de décider de la meilleure utilisation selon un seul critère.

Le **théorème de Carnot,** pour un économiste, peut se traduire de la manière suivante : *Tout produit énergétique qui peut fournir des calories à une température élevée devrait être utilisé en priorité à la production*

▶ *Quelques définitions utiles.*

Ressources
On utilise ce mot pour les matières premières qui ne sont pas susceptibles d'être renouvelées. Elles représentent la quantité totale disponible à la surface de la Terre de ces matières premières exploitables avec succès dans un avenir prévisible. On parle ainsi de ressources de charbon, de pétrole ou d'uranium. Ces ressources n'étant pas renouvelables, on peut évaluer une échéance d'épuisement à partir des prévisions concernant la consommation.

Ressources sûres
Pour un pays donné, on entend par ressources sûres celles dont l'exploitation n'est soumise à aucun aléa politique. En pratique, ce sont les ressources dont les gisements se situent sur le territoire national.

Dépendance énergétique
Le taux ou le degré de dépendance énergétique d'un pays est le rapport entre la quantité d'énergie importée (ressources non sûres) et la quantité d'énergie consommée (importations plus ressources nationales). A titre d'exemple, le taux de dépendance énergétique de la France était de 75 % en 1975; l'objectif du VII[e] plan est de ramener ce taux à une valeur de 55 % environ en 1985, grâce au programme électronucléaire.

Prix de l'énergie
Il faut distinguer :
— les *prix internationaux,* qui s'établissent par rapport à une énergie de référence, hier le charbon, aujourd'hui le pétrole;
— les *prix nationaux,* propres à chaque pays, liés aux précédents sous réserve de taxes ou de subventions et qui, en influençant la consommation, permettent aux pays d'établir une politique énergétique.

Réserves
Le terme de réserve est employé dans un sens plus restrictif que celui de ressource. C'est la fraction correspondante des ressources qui ont été mesurées et que l'on suppose exploitable à un coût donné en utilisant la technologie disponible.
Si le prix de l'énergie augmente et si l'on consent la répercussion de cette augmentation sur l'extraction d'un combustible, les réserves de celui-ci sont alors plus grandes, car il devient possible d'exploiter des gisements plus pauvres dans des conditions économiquement rentables. On admet, par exemple, que le doublement du prix de l'énergie multiplie aujourd'hui par quinze environ les possibilités des gisements de charbon.

Combustibles fossiles
Certains combustibles proviennent de déchets organiques décomposés lentement au cours des âges géologiques sous l'action d'agents physiques et chimiques. On est donc en présence d'un processus de fossilisation, d'où l'expression « fossile » utilisée pour ces combustibles. On sait que les charbons ont une origine végétale, alors que le pétrole aurait une origine animale.

Combustibles synthétiques
Certains combustibles naturels, qui font donc partie des énergies primaires, peuvent être produits artificiellement par des procédés de synthèse. On peut fabriquer par exemple du pétrole ou du gaz à partir du charbon. Ces combustibles synthétiques appartiennent donc aux énergies secondaires.

Recyclage
Le recyclage de l'énergie est impossible. L'énergie se transforme tout en se dégradant jusqu'au moment où elle devient inutilisable. Il faut noter en revanche que la plupart des matériaux peuvent être recyclés : les métaux par exemple. Comme cette opération consomme bien souvent beaucoup moins d'énergie que l'élaboration initiale du matériau, le recyclage peut permettre des économies importantes d'énergie.

Énergies nouvelles
Les énergies dites nouvelles sont ainsi qualifiées, car on pense qu'elles sont en mesure de satisfaire à l'avenir une partie plus ou moins grande des besoins énergétiques. La plupart de ces énergies, comme l'énergie solaire, l'énergie éolienne et la géothermie, sont connues depuis très longtemps, mais leur utilisation ne s'est pas développée de façon significative jusqu'à aujourd'hui en raison des difficultés diverses liées à leur exploitation.

Ratio réserve / production courante
Ce rapport est évalué en années. Il indique le temps au bout duquel la réserve sera épuisée. Il suppose que la production des années à venir reste égale à la production annuelle actuelle.

d'énergie mécanique d'un travail, et ne devrait pas fournir des calories pour le chauffage domestique.

Ce théorème est d'autant plus valable pour la production d'électricité.

La chaleur de combustion du fuel peut être transformée en énergie électrique avec un rendement de 30 à 40 % qui ne peut être atteint par des sources d'énergie à température relativement basse.

Dans le même ordre d'idée, l'utilisation des énergies mécaniques gratuites et renouvelables (rivières, marées) est un merveilleux moyen de production de l'électricité, car elle évite une transformation d'énergie.

Par contre, pour le chauffage domestique et pour satisfaire les besoins nécessitant un apport de calories à faible température, il semble logique de vouloir utiliser en priorité des sources dites gratuites ou à basse énergie.

Autre illustration, celle de la *pompe à chaleur,* ou plutôt *pompe à entropie* qui, moyennant un travail, fait passer de la chaleur dans le sens inverse de l'écoulement naturel avec des coefficients de performance supérieurs à 1, et permet d'utiliser des sources d'énergie dites gratuites comme l'air ou l'eau d'une rivière.

L'eau de refroidissement des centrales nucléaires est un sous-produit que l'on peut utiliser pour le chauffage domestique, si son transport peut se faire dans des conditions économiques favorables. A l'inverse, l'hydrogène est un très bon combustible, susceptible d'emplois très divers, mais sa fabrication nécessite des températures de dissociation de l'ordre de 730 °C à 1 000 °C ou de passer par l'électrolyse. C'est un bon vecteur à haute énergie et, partant, un bon moyen de stockage.

La crise pétrolière

Ce serait une erreur que de faire remonter à la guerre du Kippour d'octobre 1973 les difficultés que connaît l'industrie pétrolière.

L'Organisation des pays exportateurs de pétrole a été créée le 14 septembre 1960. Sa première action a été d'augmenter les ressources fiscales des pays producteurs. Dès 1964, d'importantes modifications fiscales ont été apportées par les accords de Djakarta. Durant la période 1950-1970, les réserves du Moyen-Orient ont été décuplées, provoquant un profond bouleversement géographique en faveur du Moyen-Orient et également de l'Afrique.

Cette pléthore a entraîné une évolution à la baisse qui s'est inversée depuis 1970. En 1969 l'entrée en vigueur de la législation antipollution et de lois coûteuses sur la sécurité des mines de charbon aux États-Unis provoquait une hausse de ce produit sur le marché américain. La demande de l'industrie sidérurgique japonaise, étant supérieure aux substitutions vers le fuel à l'intérieur des États-Unis, contribua à consolider cette situation.

Les raffineries américaines axées vers la production de l'essence ne purent satisfaire la demande de fuel et les tensions se reportèrent sur le marché européen.

La tension des prix s'est répercutée sur le transport, par suite de la fermeture pendant plusieurs mois d'un pipe-line allant du golfe Persique à la Méditerranée.

Le pétrole étant transporté par des navires spécifiques, le taux de fret est très sensible à toute modification de la demande.

La crise se développe et s'amplifie notamment en Libye pour aboutir aux accords de Tripoli, et parallèlement aux accords de Téhéran en février 1971 pour les autres pays producteurs. C'est surtout au Japon et en Europe que les effets se sont fait sentir, car ces pays ne disposent pratiquement pas de production nationale.

La dévaluation officielle du dollar entraîne un nouvel accord complémentaire signé à Genève en janvier 1972.

Le système de la prise de participation des États producteurs dans les opérations des compagnies sur leur territoire s'est généralisé en octobre 1972 à New York.

A la veille de la guerre d'octobre 1973, les représentants des sociétés pétrolières et de l'O. P. E. P. s'étaient réunis à Vienne dans le dessein d'adapter les accords précédents à l'évolution de la situation énergétique. Le conflit entraîna la suspension de ces pourparlers. Le 16 octobre, les pays arabes producteurs publièrent unilatéralement une déclaration à Koweit comportant notamment :

— un embargo discriminatif suivant les pays, dont l'impact ne fut en réalité pas très grand du point de vue quantitatif, mais d'une portée réelle sur les consommateurs;

— une modification des prix affichés, base sur laquelle est calculée la fiscalité.

La réunion de décembre 1973 à Téhéran entérina cette décision, fixant le prix affiché à 11,6 dollars par baril.

En septembre 1974 à Vienne, les pays de l'O. P. E. P. augmentèrent les pourcentages de redevance et d'impôt; certains d'entre eux ont de plus nationalisé une partie des actifs des sociétés pétrolières, posant ainsi les problèmes de l'indemnisation, des garanties du partenaire minoritaire, du rachat du pétrole appartenant à l'État.

Ces décisions ont entraîné une grande complexité dans le calcul des prix et des coûts du pétrole brut, source d'interprétations divergentes pour chacune des parties intéressées.

Dans un dessein de simplification, en novembre 1974 le prix affiché a été abaissé de 0,40 $/bbl, soit 11,25 $/bbl. Mais la redevance est passée de 16,65 % à 20 % et l'impôt sur les bénéfices déjà fixé à 65 % est passé à 85 %. Au premier octobre 1975, les prix ont été de plus augmentés de 10 %.

Cette crise a eu les répercussions que l'on sait sur toutes les énergies de l'économie mondiale en général.

Bien qu'il soit très difficile de définir le prix exact du brut, on peut essayer de suivre depuis 1955 le prix de revient du pétrole appartenant en propre aux compagnies. Pour le pétrole de référence « Arabian Light », on peut déduire du prix affiché (P) le coût technique (C) et le montant des royalties (R), puis répartir l'impôt sur les bénéfices selon les diverses clefs (I) intervenues lors des accords successifs :

$$\text{Prix de revient} = R + C + I\,[P - (R + C)]$$

Ainsi, si l'on prend comme base 100 en 1955, on peut construire un indice d'évolution du prix de revient du pétrole brut.

Cet indice baisse de façon constante dans les années 1960 pour atteindre 94 en 1970. Puis, de 1970 à 1976, on assiste à une montée vertigineuse dont les paliers correspondent aux divers accords précédemment cités jusqu'à 933 (*fig.* 6 et 7).

Les prix du pétrole étant exprimés en dollars, il est légitime de les corriger de l'effet de l'inflation de cette monnaie. Pour ce faire, l'indice du coût de la vie aux États-Unis (publié par l'I. N. S. E. E.) a été utilisé.

On obtient ainsi un indice d'évolution de ce prix de revient de référence, exprimé en dollars constants. Cet indice enregistre un minimum de 65 en 1970 et augmente jusqu'à 435 en 1976.

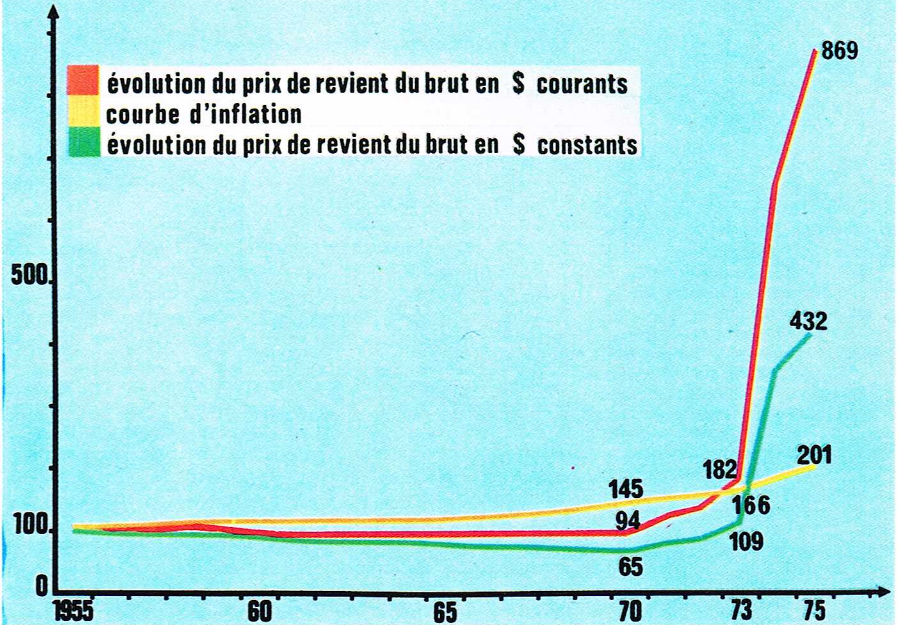
Encore une fois, il ne s'agit là que d'un exemple retraçant l'évolution du prix de revient pour l'Arabian Light, pétrole de référence pour la fixation des prix O. P. E. P.

Il ne s'agit donc que d'un ordre de grandeur, ne tenant pas compte des variations d'un pétrole brut à l'autre, ni du prix de cession du « pétrole participation », ni des reventes entre compagnies et à l'intérieur des compagnies.

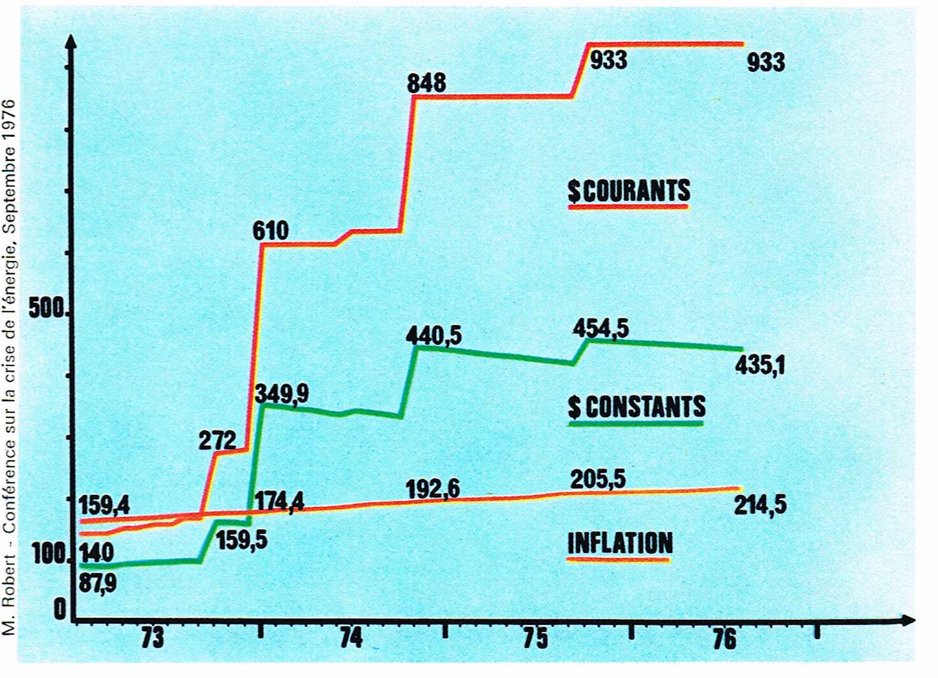
Mais il est impossible de se référer aux prix sur le marché libre correspondant à des opérations « spot », car ce marché porte sur des quantités marginales. Il se fait au coup par coup en fonction des cargaisons disponibles. Les prix y sont donc très sensibles aux fluctuations conjoncturelles.


Henri Bureau - Sygma

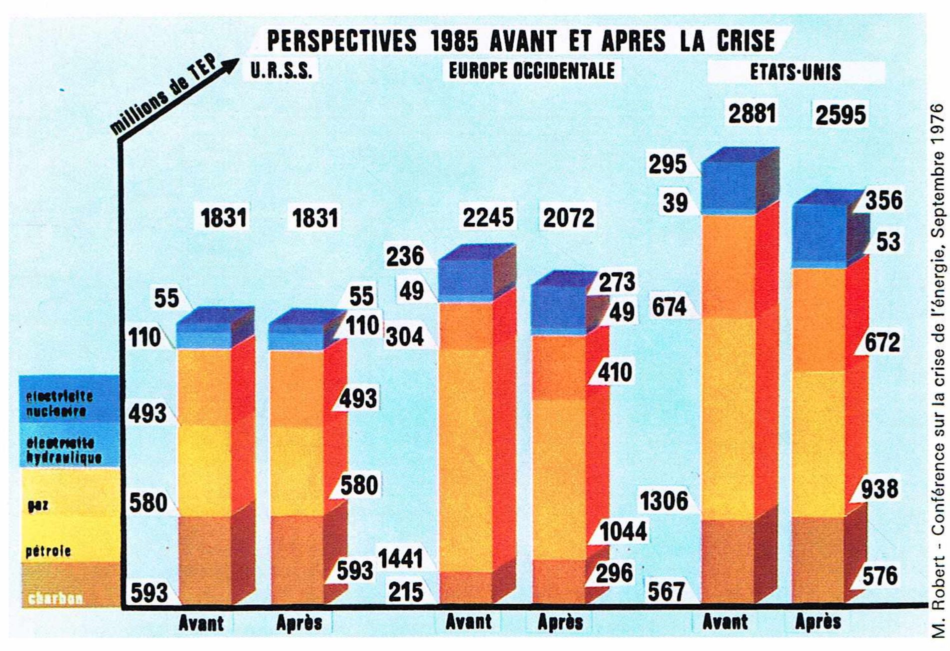
▲ *Vue générale de la Conférence préparatoire sur l'énergie, qui s'est tenue avenue Kléber à Paris, en octobre 1975.*
▼ *Figures 6 et 7 : diagrammes montrant l'évolution du prix de revient du pétrole brut de 1955 à 1976, pour l'Arabian Light, pétrole de référence pour la fixation des prix O. P. E. P.*



M. Robert - Conférence sur la crise de l'énergie, Septembre 1976



M. Robert - Conférence sur la crise de l'énergie, Septembre 1976



M. Robert - Conférence sur la crise de l'énergie, Septembre 1976

▲ *Figure 8 : diagramme des perspectives faites, à l'horizon de 1985, avant et après la crise de 1973.*

▼ *Ci-dessous, unités de soudage travaillant à la construction du gazoduc reliant les Pays-Bas à l'Italie et passant, ici, en Suisse. Au centre, l'équipement ultra-moderne d'une mine de charbon mise récemment en production par la Standard Oil à New Jersey; la crise pétrolière a modifié les politiques énergétiques des grands pays consommateurs et l'on assiste, aux États-Unis notamment, à une reprise intensive de l'exploitation de la houille.*

Les consommations énergétiques en 1985

La crise pétrolière récente a modifié les politiques énergétiques des grands pays consommateurs.

Pour mettre en évidence ce changement, nous pouvons opposer les prévisions faites, à l'horizon 1985, avant et après la crise de 1973 (*fig.* 8).

L'optimisme d'avant la crise prévoyait, pour l'Europe occidentale, une consommation de 2 245 millions de T. E. P. qui a été par la suite diminuée de 7,7 %.

En dehors de cette modification en valeur absolue, on assiste à une redistribution quant aux parts des diverses formes d'énergie devant satisfaire les besoins énergétiques.

Une reprise intensive de l'exploitation de la **houille** en Europe n'est pas facile, de par les problèmes de main-d'œuvre et les difficultés techniques d'exploitation des gisements européens. Cependant, la part du charbon passe de 9,5 % à 14,3 % avant et après la crise. On sera donc probablement conduit à importer du charbon des États-Unis ou de Pologne.

Si, pour des raisons de conservation de leurs ressources énergétiques nationales, les États-Unis en venaient à limiter ces approvisionnements, l'Europe se tournerait vers des pays producteurs tels que l'Australie, l'Afrique du Sud et éventuellement les pays socialistes. Cependant, les réserves considérables des États-Unis permettraient la satisfaction de leur demande intérieure ainsi que celle des importations européennes.

La part du **pétrole** a par contre baissé de 64 % à 50 %. Les réserves prouvées en mer du Nord, bien qu'allant chaque jour en augmentant, ne pourront, en aucun cas, satisfaire à cette demande, mais, en revanche, assureront l'indépendance énergétique de la Grande-Bretagne et de la Norvège. La zone située au nord du 62e parallèle semble également prometteuse, mais les conditions d'exploitation y sont très difficiles. L'utilisation du pétrole mettra l'Europe en position de dépendance vis-à-vis de l'extérieur.

Le **gaz naturel** est appelé à se substituer en partie au pétrole. Sa part passe de 13 % à 19,7 %. La réalisation de ces prévisions dépend largement des réserves disponibles dans les gisements de Groningue, mais également des gisements de la mer du Nord, Ekofisk, Frigg, etc.

Ces gisements serviront à maintenir un certain taux d'expansion, au-delà des années 1980. Mais cet objectif exige une infrastructure d'importation. C'est dans cette optique que se situent les projets de construction d'un gazoduc de Sibérie vers l'Europe et les chaînes de liquéfaction du gaz nord-africain. Des études sont également en cours pour voir s'il serait possible de transporter le gaz algérien par gazoducs en Italie.

Pour l'**hydraulique**, les grands sites ont déjà été aménagés et on ne pense guère construire que des centrales au fil de l'eau, donc de faible puissance et d'intérêt purement local.

La part du **nucléaire** passe de 10 % à 13 %. L'industrie, au prix d'un effort considérable, a réussi à démontrer la fiabilité d'un certain nombre de réacteurs. En outre, la fin de l'ère des combustibles fossiles à bon marché a mis en lumière un des avantages spécifiques de l'énergie nucléaire, à savoir la relative stabilité et le niveau relativement bas des coûts du combustible nucléaire.

Cependant, les prévisions supposent que les programmes ne seront pas retardés et même que la tendance actuelle s'inversera dans un avenir proche.

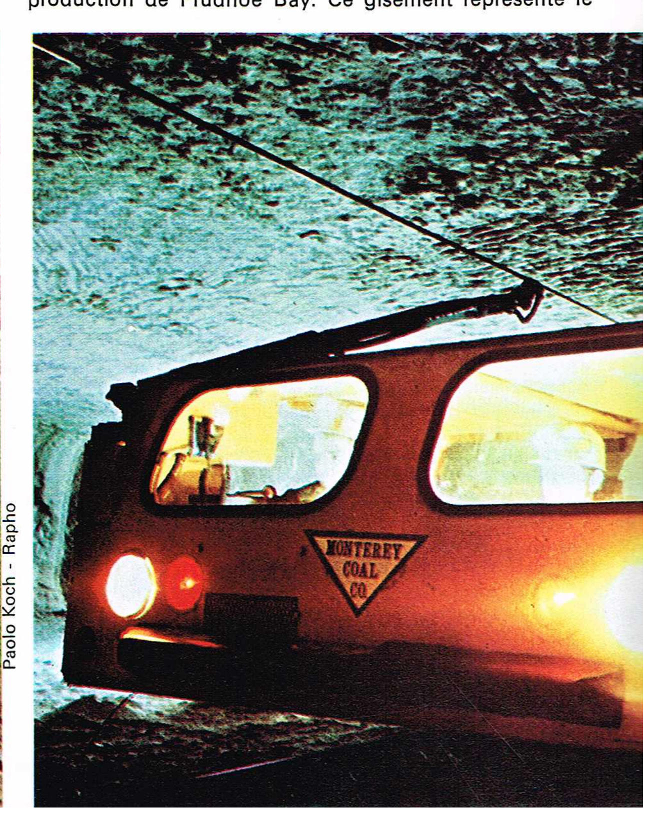
Consommation énergétique aux États-Unis

Aux États-Unis, le charbon est évidemment à la hausse. Sa part passe de 19,7 % à 22,2 %, alors que la demande globale d'énergie devrait baisser de 10 % (de 2 881 à 2 595 millions de T. E. P.). Le charbon est donc amené à jouer un rôle déterminant.

La crise pétrolière a eu pour effet un renversement de la tendance au ralentissement de l'activité de forage qui se manifestait depuis 1970. Cependant, la part du pétrole baisse considérablement d'une prévision à l'autre, de 45 % à 36 %, et ce bien que l'on attende pour 1977 la production de Prudhoe Bay. Ce gisement représente le



Paolo Koch - Rapho



quart des réserves des États-Unis. Le projet « Indépendance » limite donc l'utilisation du pétrole brut.

Dans le cas des États-Unis, le relais n'est pas pris par le gaz naturel. Sa part passe de 23,4 % à 26 %. Cependant, à plus long terme, on peut espérer voir se développer le potentiel gazier de l'Alaska.

Consommation énergétique en U. R. S. S.

Les prévisions de l'U. R. S. S., par contre, n'ont pas été influencées par la crise. On ne peut que constater une consommation équilibrée : 32 % pour le charbon, 31,6 % pour le pétrole, 27 % pour le gaz, 6 % pour l'hydraulique et 3 % pour le nucléaire. Les plans quinquennaux ne sont pas affectés par les troubles du monde occidental.

Certes, ces prévisions ne seront peut-être pas réalisées, mais leur intérêt n'est pas de faire une prophétie, mais de guider l'action immédiate. Tout changement quant à la satisfaction des besoins énergétiques implique des changements structurels que l'on doit prévoir longtemps à l'avance pour respecter les délais de mise en place.

Consommation énergétique au Japon

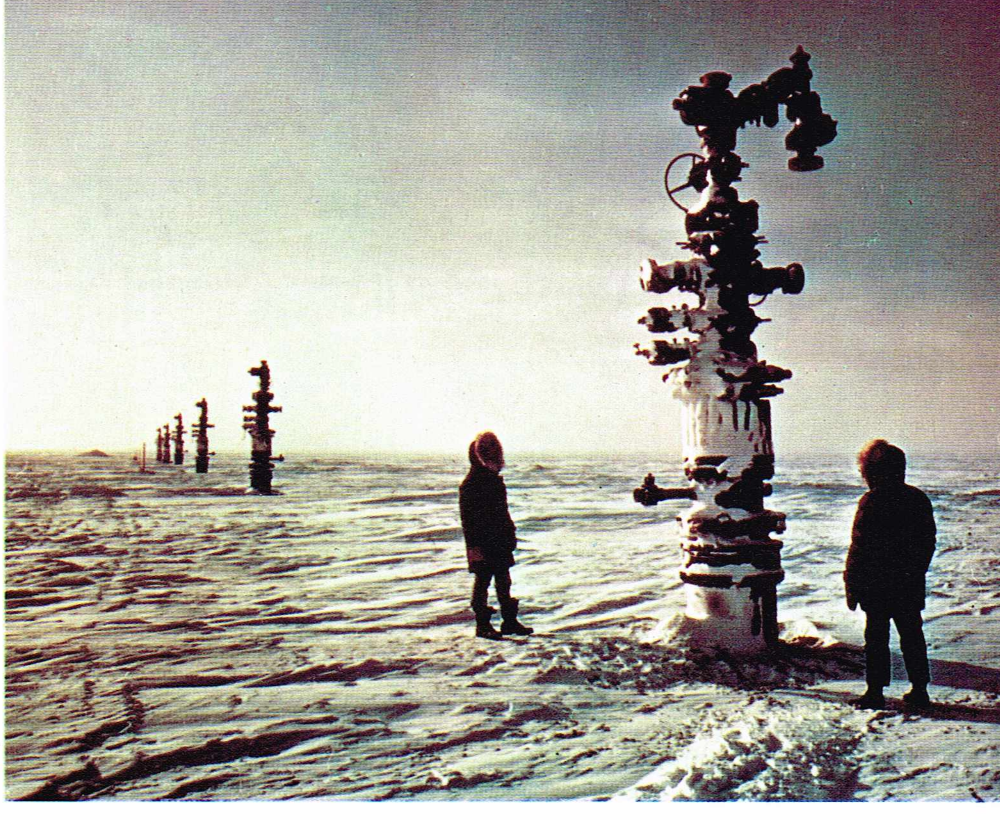
La consommation énergétique du Japon est extrêmement dépendante de l'extérieur. La consommation finale du Japon est évaluée à 257 millions de T. E. P. pour l'année 1974.

La production nationale d'énergie primaire ne représente que 13 % des besoins. Elle provient pour 35 % du charbon. Les énergies nucléaire, hydraulique et géothermique représentent 58 % de l'énergie indigène. La production pétrolière est inexistante, cependant la consommation de pétrole n'a cessé de croître depuis 1960. Le total des besoins s'élevait à 29,16 millions de T. E. P. en 1960 pour atteindre 235,78 millions de T. E. P. en 1974, soit 70 % des besoins. Le Japon est donc extrêmement dépendant vis-à-vis de l'extérieur pour la couverture de ses besoins énergétiques. Le pétrole provient principalement du golfe Persique (205 Mt) et dans une moindre part d'Indonésie (30 Mt).

Il est donc essentiel pour ce pays de diversifier ses ressources. Cette politique de diversification se dirige vers l'Amérique du Sud. De récents contrats ont été passés avec le Venezuela pour l'importation de pétrole brut. Elle s'accompagne d'un dynamisme très grand pour l'exportation de produits industrialisés et de technologie. C'est en quelque sorte une fuite en avant qui n'est pas sans amener des tensions sociales et quelques déboires du point de vue de l'environnement.

Le seul pays de l'O. C. D. E. où la consommation de charbon ait augmenté, est le Japon, bien que les importations représentent 75 % des besoins.

Nous devons aussi remarquer que le Japon est le pays où l'on a enregistré la plus forte croissance de la consommation finale d'énergie entre 1960 et 1974.



U.S.I.S.

▲ *Le gaz naturel est appelé à se substituer en partie au pétrole, c'est pourquoi les réserves de gaz naturel, même les plus difficiles à exploiter, comme ici au-delà du cercle Arctique, constituent un potentiel énergétique de relais à plus ou moins long terme.*

Consommation énergétique au Canada

La structure de la consommation au Canada est très différente, le Canada étant un pays producteur d'hydrocarbures.

Les exportations vers les États-Unis se montent à 43,5 millions de T. E. P. et sont compensées par des importations pour un montant équivalent. C'est une simple redistribution régionale, en fonction des marchés locaux, sans distinction de frontière.

Les réseaux de gaz font également abstraction des frontières, mais les exportations ne sont pas compensées par des importations. L'hydraulique et le nucléaire couvrent les besoins totaux en énergie pour 30 %. Si la part du charbon n'a cessé de décroître depuis 1960, c'est au détriment des importations, car la production nationale a enregistré un mouvement inverse. En 1974, la part du charbon dans les besoins totaux était de 7 %, couverte pour 83 % par la production nationale.

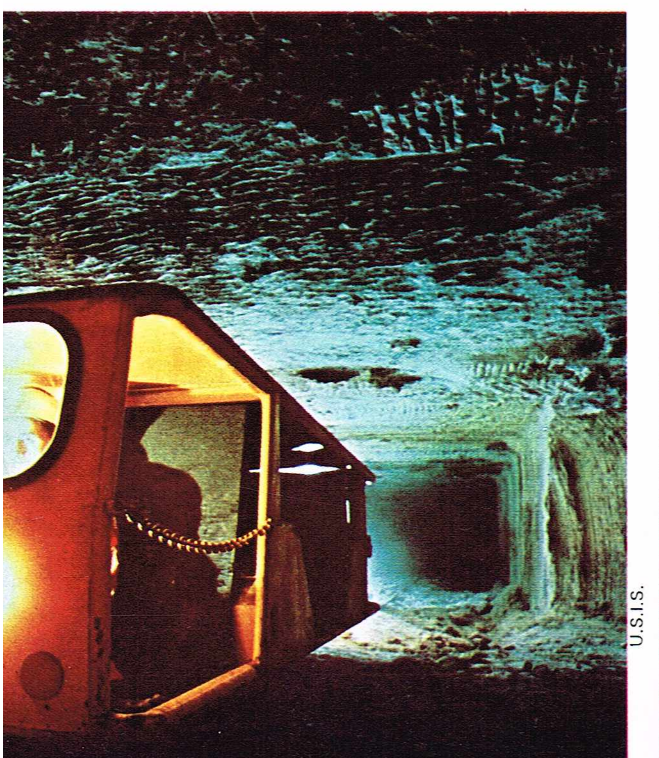
Le Canada semble donc dans une situation énergétique favorable. L'évolution de son ratio réserves d'hydrocarbures/production courante a enregistré une baisse de 1967 à 1972 pour se stabiliser aux environs de 15. La part des hydrocarbures est de 67,5 % dans la satisfaction des besoins en énergie.

La crise pétrolière a affecté le Canada, mais les efforts entrepris dans le domaine du nucléaire, la valorisation



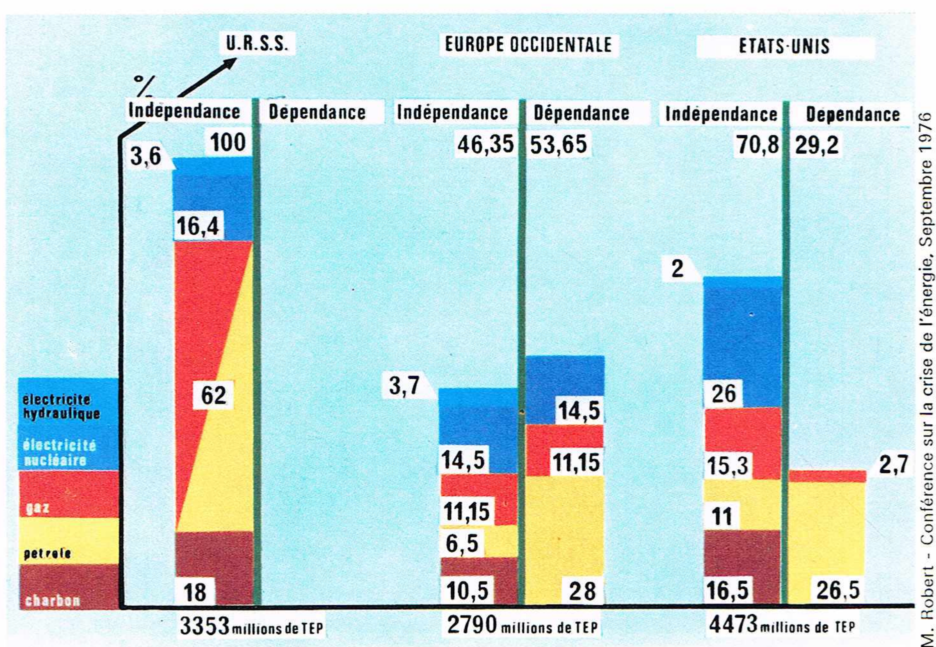
▼ *Ile artificielle de prospection pétrolière construite par le Canada en mer de Beaufort (océan Arctique).*

Paolo Koch - Rapho



U.S.I.S.





M. Robert - Conférence sur la crise de l'énergie, Septembre 1976

▲ *Figure 9 : schéma mettant en relief la position de dépendance dans laquelle se trouvent les pays industrialisés ; cette dépendance est d'environ 54 % pour les pays d'Europe occidentale.*

▼ *Figure 10 : schéma mettant en relief la dépendance de ces mêmes pays dans l'espoir de développements d'énergies nouvelles ; ce « pourcentage de dépendance » passe à 52 % pour les pays d'Europe occidentale.*

d'autres ressources abondantes, comme les sables bitumineux, et la prospection pétrolière en zone arctique doivent assurer à ce pays une indépendance énergétique satisfaisante.

Dépendance et indépendance énergétique

La crise énergétique pose le problème des approvisionnements en matières énergétiques et l'embargo décidé à Koweit par les pays arabes a mis en relief la position de dépendance dans laquelle se trouvent les pays industrialisés.

Nous reprendrons ici une estimation fournie par monsieur Robert, lors de sa conférence à Strasbourg en septembre 1976, en rappelant les difficultés inhérentes à cet exercice et qu'il ne s'agit que d'un schéma (*fig.* 9).

Pour l'**Europe**, on peut penser que le charbon, outre la production propre, offre une garantie suffisante dans les approvisionnements pour nous placer dans une position d'indépendance.

Le pétrole nous met en position de dépendance pour le tiers de notre consommation totale d'énergie à l'horizon 2000, et ce, malgré l'effort de recherche et de développement en mer du Nord.

Le gaz naturel nous met dans une situation d'équilibre entre dépendance et indépendance pour les raisons évoquées plus haut.

Pour l'uranium, l'incertitude est grande, mais les besoins pour satisfaire aux plans de développement de l'énergie nucléaire le sont également ; il a donc été choisi la même répartition que pour le gaz.

L'énergie hydraulique, dont le potentiel ne peut guère être augmenté de façon notable, est par contre très intéressante du point de vue de l'indépendance.

De ce schéma, on peut conclure que nous dépendons pour 54 % environ de nos besoins. Les espoirs quant aux développements des énergies nouvelles (éolienne, solaire, géothermique), pour importants qu'ils soient en Europe (4 % de nos besoins) n'inversent pas cette position de dépendance. Le « pourcentage de dépendance » passe à 52 % (*fig.* 10).

Pour les **États-Unis**, la situation est très différente et leur dépendance résulte exclusivement du pétrole et un peu du gaz naturel, qui doit en grande partie prendre le relai. Notons que l'énergie nucléaire représente là un potentiel national qui devrait contribuer pour le quart des besoins. Les prévisions en ce qui concerne les énergies nouvelles sont plus modestes qu'en Europe.

L'**U. R. S. S.**, pays producteur d'énergie, semble par contre devoir être largement indépendante, l'énergie nucléaire ne représentant que 16,4 % et les hydrocarbures nationaux 62 %.

Le coût de l'indépendance énergétique

La politique des deux grands en matière énergétique apparaît de plus en plus clairement comme une politique de conservation des réserves de pétrole et de charbon situées sur leur sol.

Les États-Unis et les pays du COMECON s'approvisionnent sur le marché contrôlé par l'O. P. E. P. Dans ces conditions, les pays européens et en particulier la France sont obligés de poursuivre leurs programmes de développement du nucléaire et d'économie rigoureuse d'énergie.

Ceci se traduit par des augmentations de tarifs, de fiscalité, et par des efforts d'épargne, donc des réductions de la consommation. Si ces efforts ne sont pas faits, il s'ensuivra une augmentation de l'inflation et donc une détérioration du niveau de vie, tout en augmentant l'injustice sociale.

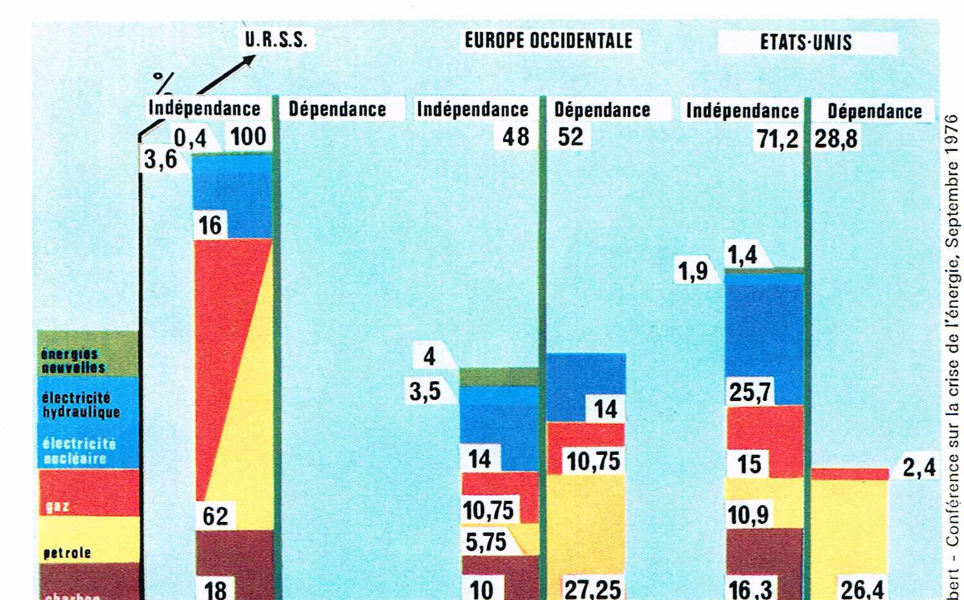
Selon le rapport de la commission de l'énergie du VIIe plan, les investissements énergétiques représentent 175 milliards de francs pour la période 1976-1980. Ce chiffre, selon la Banque de Paris et des Pays-Bas, est sous-estimé, car il ne tient pas compte des dépenses à engager pour la construction d'une deuxième usine d'enrichissement d'uranium, ni des dépenses du C. E. A. pour le retraitement du combustible à l'étranger, et la recherche pétrolière à l'étranger devrait dépasser le chiffre annoncé par le plan.

On arrive donc à une moyenne de 40 milliards par an, soit près de 13 % du total des investissements productifs français.

Les sociétés pétrolières et l'E. D. F. auront donc à dégager un auto-financement considérable sous peine de voir augmenter les emprunts à l'extérieur. Cette situation compromettrait la situation financière de ces sociétés et créerait également une tension très grave sur le marché financier français où les sommes prélevées rendraient impossible le financement des autres secteurs de l'économie.

La situation financière des sociétés pétrolières s'est détériorée. Le taux d'auto-financement est tombé de 65 % en 1971 à 41 % en 1975. L'augmentation du prix du pétrole a provoqué un accroissement considérable des charges de reconstitution des stocks qui a dû être financé par l'emprunt. Rappelons de plus que le risque inhérent à la recherche pétrolière oblige les sociétés à avoir un taux d'auto-financement considérable.

La crise n'est donc pas un événement mineur, et imposera aux pays consommateurs d'énergie un effort et une mobilisation de leurs forces pour assurer leurs besoins énergétiques. Il est à prévoir que la consommation des pays en voie de développement ira en augmentant très rapidement ; la consommation d'énergie par habitant variant approximativement comme le carré du produit national brut par habitant.



M. Robert - Conférence sur la crise de l'énergie, Septembre 1976

Consommation d'énergie et produit national brut (P. N. B.)

Il semblerait qu'il existe une liaison entre la consommation d'énergie par habitant et le P. N. B. par habitant, la consommation étant fortement croissante (*fig.* 11).

L'industrialisation explique cette relation dans son ensemble en ce sens que l'on rencontrera du côté des gros consommateurs les pays d'Amérique du Nord et d'Europe, et du côté des petits consommateurs les pays en voie de développement.

Cependant, à l'intérieur des groupes, on observe une dispersion importante autour de cette liaison. Le mode de vie et les productions nationales spécifiques doivent en être les raisons.

Ainsi, en 1972, les plus gros consommateurs d'énergie par habitant sont les Américains du Nord, avec plus de 10 000 kilos d'équivalent charbon par habitant pour un produit national brut d'environ 5 à 6 000 dollars par habitant.

La Suède, dont le P. N. B. par habitant est du même ordre de grandeur, a une consommation d'énergie de 6 000 K.E.C./habitant. La Suède, de ce point de vue, a des consommations comparables à l'Allemagne de l'Est, à la Belgique, à l'Allemagne de l'Ouest et à la Grande-Bretagne.

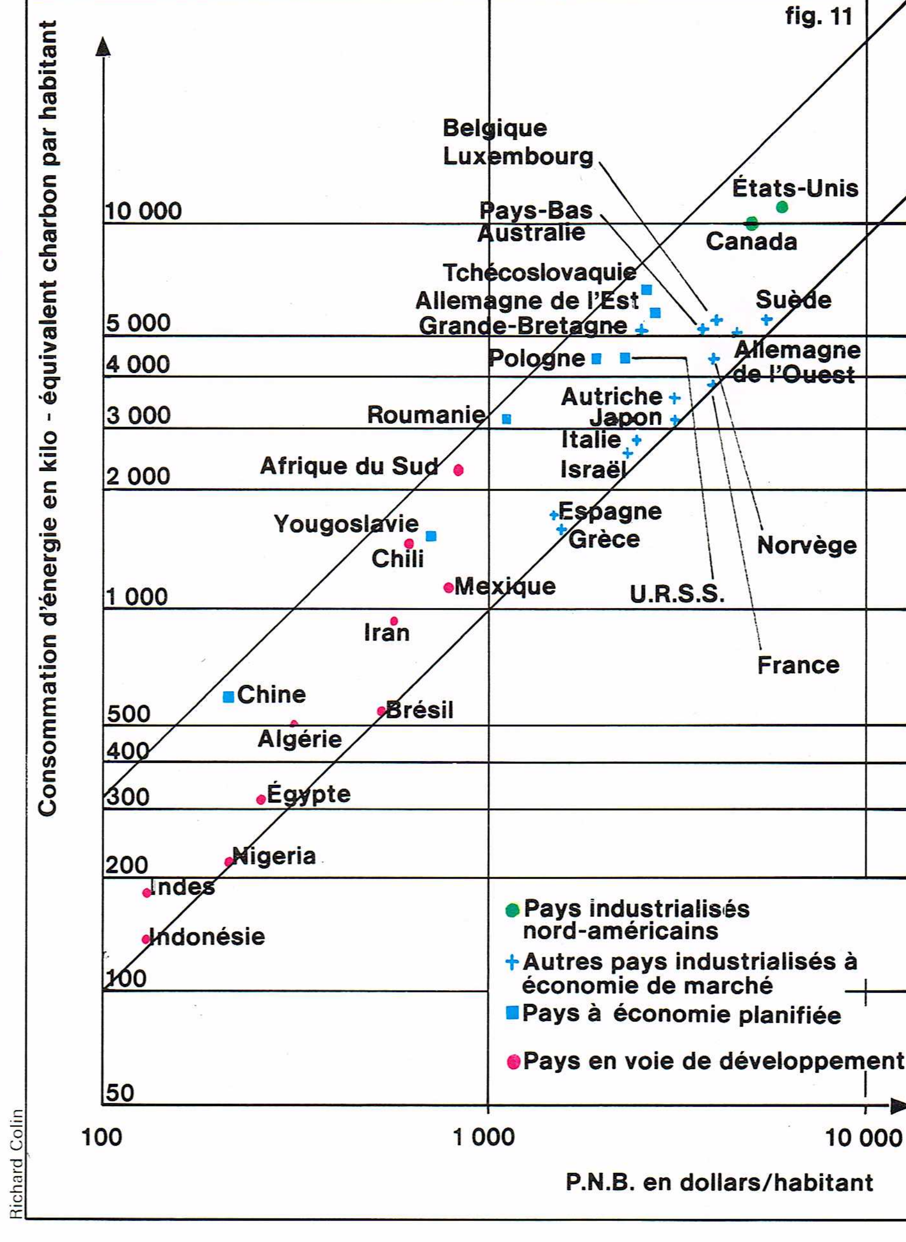
La France, dont le produit national brut par habitant est comparable à celui de l'Allemagne de l'Est, consomme moins d'énergie avec un peu plus de 4 000 K.E.C./habitant.

Les pays à économie planifiée sont relativement de gros consommateurs. Ils consomment, à P. N. B. par habitant égal, plus que les pays à économie de marché.

L'énergie est donc un facteur indispensable au développement économique. Les pays en voie de développement ont des consommations par habitant beaucoup plus faibles, variant entre 150 K.E.C./habitant et 1 500 K.E.C./habitant.

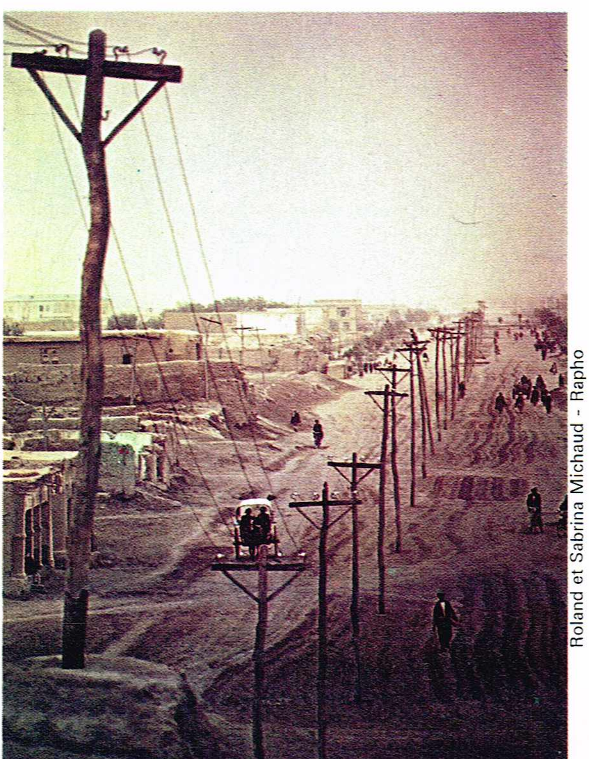
Le récent renchérissement de l'énergie pénalise extrêmement ceux qui ne sont pas exportateurs de matières énergétiques ou de matières premières qui ont enregistré des augmentations comparables. Il y a donc là un cercle vicieux inflationniste, car le prix de ces matières premières se répercute sur celui des technologies et produits finis exportables par les pays industrialisés. En effet, si, au cours d'une récession très forte, les pays industrialisés ont réussi à rétablir l'équilibre de leur commerce extérieur, la récession a diminué les importations d'énergie et de matières premières, ce qui a contribué à l'amélioration commerciale. Dès que la reprise s'est affirmée, le déficit est réapparu.

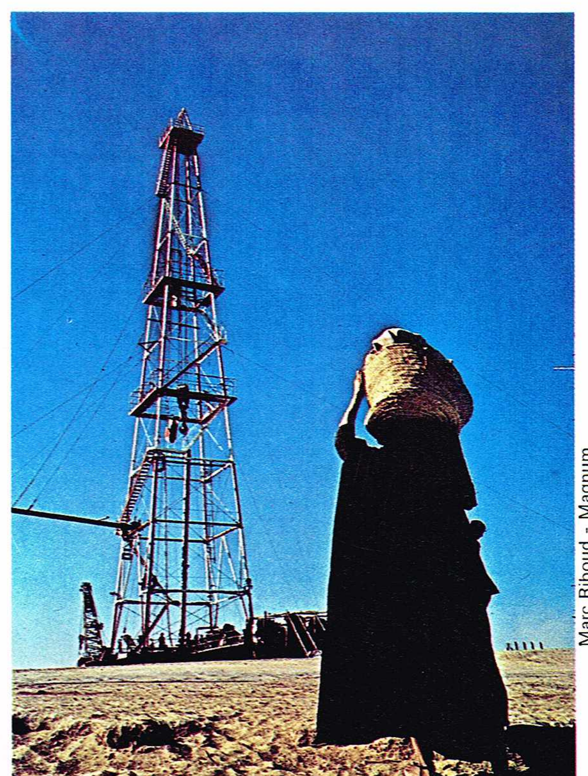
La recette globale des pays pétroliers, qui a été de 104 milliards de dollars en 1974, devrait atteindre 130 milliards en 1976 du fait de l'augmentation de la demande et de la hausse des prix.



Richard Colin

▲ *Figure 11 : graphe montrant la liaison entre consommation d'énergie et P. N. B. par habitant (1972).*


Roland et Sabrina Michaud - Rapho


Marc Riboud - Magnum

◀ *A gauche, la rue principale d'un village d'Afghanistan, pays en voie de développement difficile, pénalisé par son manque de matières énergétiques et de matières premières ; à droite, un derrick au nord de Rumeila, en Irak ; ici, les besoins internes représentent plus de 50 % des revenus pétroliers.*



J.P. Laffont - Sygma

▲ ***Dépendance et indépendance : le salut pour beaucoup se trouve dans le nucléaire. Ici, le générateur atomique Cirus, à Trombay (Inde).***

Par contre, les importations de ces pays se développent mais à un taux ralenti par rapport à l'année précédente. Dans ces conditions, le déficit global des pays importateurs ne se réduira pas.

Le problème du sous-développement n'est pas uniquement financier, mais également une question d'infrastructure existante, les ports et voies d'accès pouvant dans certains cas être très rapidement engorgés.

Tous les pays producteurs ne peuvent absorber les revenus pétroliers. Il y a deux grands groupes de pays producteurs : les uns, dont les besoins internes représentent plus de 50 % des revenus pétroliers, les autres, compte tenu soit de la faible dimension de leur territoire, soit de leur population, soit de leurs ressources en dehors des hydrocarbures, disposent d'un surplus considérable.

Dans la première catégorie se trouvent : la Libye, l'Irak, le Nigeria, l'Algérie, l'Indonésie, l'Équateur.

Pour l'année 1974, ce surplus représente 58 milliards de dollars sur 104 milliards. La répartition des investissements à l'étranger par les pays membres de l'O. P. E. P. a été la suivante en 1974 :

— 10 à 11 milliards de dollars en bons du trésor aux États-Unis ;

— 6 à 7 milliards de dollars en Grande-Bretagne, répartis entre les fonds d'état, les dépôts dans les banques et les investissements immobiliers ;

— 5 à 7 milliards en prêts à l'Europe et au Japon ;

— 4 milliards de dollars d'investissements privés en Europe ;

— 4 milliards de dollars au Fonds monétaire international ;

— 2,5 milliards aux pays en voie de développement ;

— 21 à 23 milliards de dollars flottant sur le marché de l'eurodollar.

Ces fonds ne sont pas sans créer de fortes tensions sur le marché monétaire international, risquant de compromettre le redressement des pays consommateurs et d'augmenter le déficit des pays en voie de développement.

Les pays producteurs de l'O. P. E. P. sont des pays en voie de développement plus ou moins avancé. Ces pays n'ont pas intérêt à voir s'installer un désordre international qui compromettrait l'opportunité de développement qu'ils ont actuellement. Il apparaît nécessaire de voir s'établir une « coopération » allant au-delà du problème du pétrole et qui soit véritablement une coopération économique et technique dans l'intérêt mutuel.

L'idéal serait de voir s'installer un circuit triangulaire d'échanges entre les pays producteurs de pétrole qui prêteraient aux pays en voie de développement, ceux-ci en retourneraient les sommes aux pays industrialisés, en se procurant les biens d'équipement et le savoir-faire qui leur permettraient enfin de faire démarrer leur développement.

Ce système utopique ne pourrait se développer que si les pays producteurs recevaient des garanties financières que seuls les pays industrialisés pourraient offrir.

De plus, le transfert de la technologie ne peut se faire brutalement dans tous les secteurs industriels. Il est nécessaire d'implanter des technologies qui soient effectivement des facteurs de développement, génératrices d'emploi, et adaptées à l'environnement économique, à l'infrastructure et aux besoins spécifiques des classes les plus pauvres de ces pays.

Le commerce international porte pour une grande part sur les denrées alimentaires. Les États-Unis exportent chaque année des quantités énormes de blé. Pour certains pays producteurs de matières premières, le problème de l'indépendance se pose en termes d'importation de céréales, de viande, etc., ce qui est tout aussi crucial. Il serait souhaitable de trouver là aussi un terrain d'entente harmonieux, comme le souligne Perez Alfonso, l'un des fondateurs de l'O. P. E. P.



J. Nance - Magnum

▶ ***Avec le feu a commencé notre dépendance vis-à-vis de l'énergie.***

Mais si le bilan semble pouvoir s'équilibrer au niveau de la planète, dans les faits, c'est à l'échelle des nations que les échanges se produisent, et là l'individualité de chaque pays complique singulièrement le problème.

Conclusion

L'énergie est la clef de voûte des sociétés humaines. Toutes les civilisations primitives ont utilisé le feu comme source d'énergie. Celui-ci fut en effet le premier moyen trouvé par l'homme pour avoir de l'énergie à sa disposition, et avec le feu a commencé notre dépendance vis-à-vis de l'énergie. On voit toute l'importance du mythe de Prométhée, qui avait volé le feu aux dieux pour l'apporter aux hommes. L'histoire dit aussi qu'il leur enseigna toutes les connaissances marquant le début de la civilisation : art de construire, travail des métaux, l'écriture, la médecine, l'art de dompter les animaux, etc.

Cette dépendance de l'énergie a augmenté avec le développement de nos sociétés. Aujourd'hui, ces dernières consomment plus ou moins d'énergie, mais toutes en font usage. Les sources sont variées : pétrole, charbon, gaz, uranium ; les usages très divers : transport, chauffage, éclairage, activité industrielle. La soif d'énergie n'a d'égale que la volonté de développement. Pas de croissance sans un approvisionnement régulier et à prix raisonnable de l'énergie ; pas d'existence même, pour nos sociétés, sans énergie, tant celle-ci nous est devenue indispensable. Le mythe de Prométhée, liant énergie et civilisation, domine inéluctablement notre monde.

Le Club de Rome

Aux différentes questions posées par la croissance de nos sociétés, la réponse la plus frappante de ces dernières années est celle apportée par le Club de Rome (groupe international de personnalités de toutes cultures qui a été fondé en 1968 par Aurelio Peccei et dont le projet ambitieux est de contribuer à maîtriser le futur) en 1972 par la publication d'un rapport établi pour son compte par le MIT (Massachusetts Institute of Technology). Ce document, souvent appelé rapport Meadows, du nom de deux de ses auteurs, a été publié en français la même année dans un livre portant le titre *Halte à la croissance*. Une des conclusions qui ont retenu le plus l'attention du public était la prédiction du déclin des civilisations sous l'action simultanée de la surpopulation, de la pollution et de l'épuisement des matières premières, si aucun changement n'intervenait dans notre type et notre rythme de croissance.

L'énergie figurait bien évidemment au premier rang des accusés. La croissance de la consommation est en effet inévitable sous le double effet de l'augmentation de la population et de l'augmentation du niveau de vie. Le rapport rappelait à ce propos l'étroite corrélation existant entre la consommation d'énergie et le « produit national brut » par habitant.

D'autre part, la quasi-totalité de l'énergie utilisée aujourd'hui provient des combustibles fossiles (charbon, hydrocarbures et gaz naturel). Leur combustion rejette dans l'atmosphère des quantités considérables d'anhydride carbonique (CO_2). Les effets climatologiques et écologiques d'un accroissement important de la teneur de l'atmosphère en gaz carbonique seraient considérables. L'utilisation de l'énergie nucléaire n'entraîne pas ce type de pollution. En revanche, les centrales utilisant ce principe, en service aujourd'hui, ne sont pas sans conséquence sur l'environnement. Venant d'une source autre que le rayonnement solaire, leur chaleur réchauffe l'atmosphère. Cette « pollution thermique » peut, si elle est excessive et localisée sur des portions de rivières ou de plans d'eau (lacs ou mers), détruire la vie aquatique. La pollution thermique pourrait avoir une influence importante sur le climat si elle atteignait, à l'échelle de la planète, un pourcentage notable de l'énergie solaire.

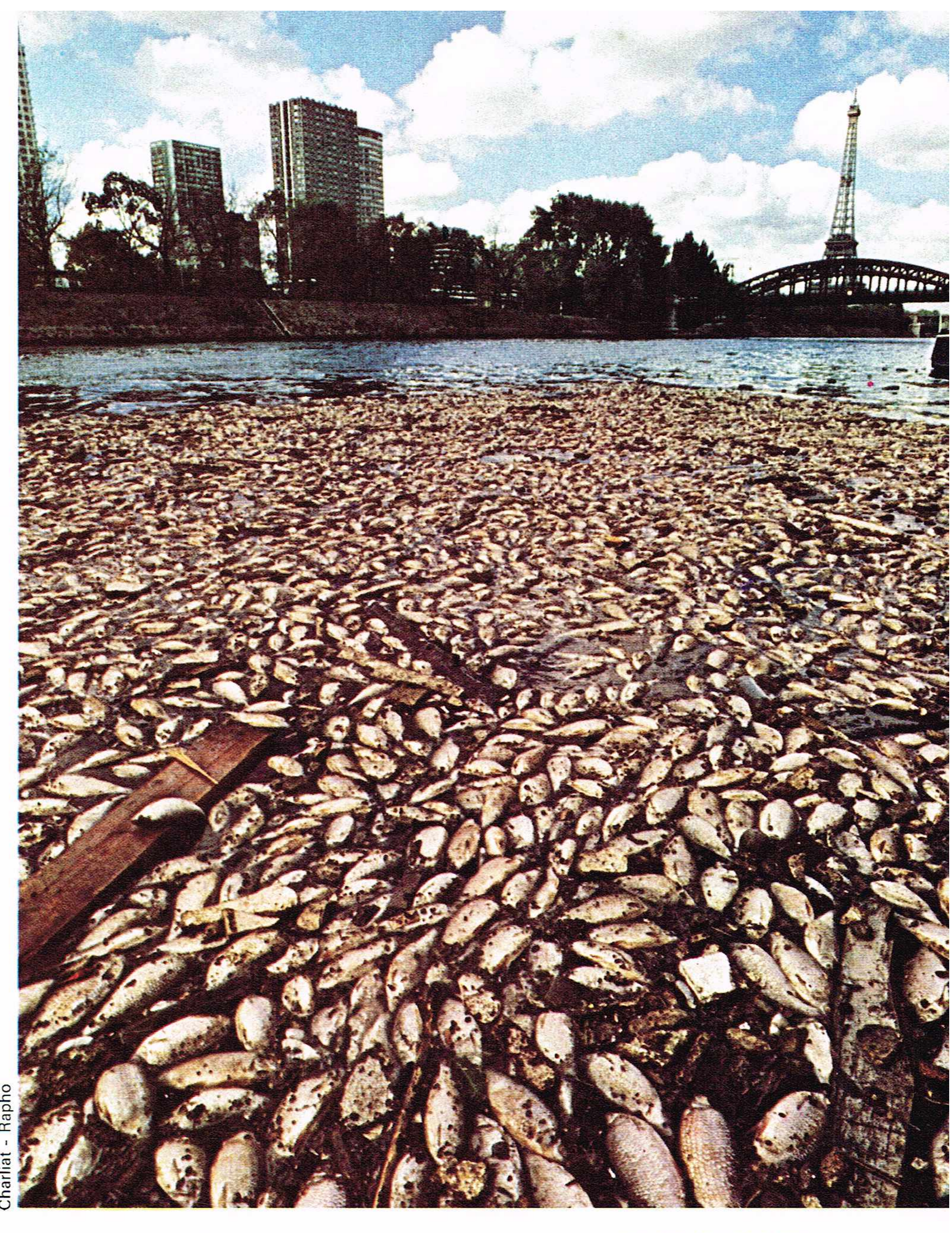
L'énergie nucléaire engendre également un autre agent polluant : les déchets radio-actifs. Le recours au nucléaire étant encore faible, les conséquences de ces déchets sur l'environnement sont inexistantes. Le problème se poserait différemment à long terme si une croissance de la consommation énergétique forte et généralisée n'était assurée que par le nucléaire.

Enfin, si on considère à présent les ressources énergétiques, les perspectives à long terme ne sont guère réjouissantes. Comme nos ressources traditionnelles en combustibles fossiles et en uranium sont « non renouvelables », aucun niveau de réserves ne peut résister à une croissance exponentielle de la consommation d'énergie. Même une sous-estimation du simple au double de nos réserves ne ferait que retarder l'échéance fatale de quelques années.

Quelles formes prendrait cette échéance ?

Dans le rapport Meadows, on trouve plusieurs réponses, car, suivant les hypothèses retenues concernant le contrôle de la démographie, la lutte contre la pollution et le taux de recyclage des matières premières, les actions entreprises portant sur l'un ou sur plusieurs de ces points, les conclusions diffèrent. Mais, dans tous les cas où il n'y a pas de mesures énergiques et rapides de stabilisation, on aboutit à ce qui est appelé dans ce rapport un effondrement de la civilisation soit par pénurie de nourriture et de ressources naturelles, soit par effondrement de la production, soit par une croissance démesurée de la pollution. Les échelles de temps des courbes présentées dans le rapport sont peu précises mais permettent de situer la plupart des situations catastrophiques dans la deuxième moitié du XXI[e] siècle (*fig.* 12).

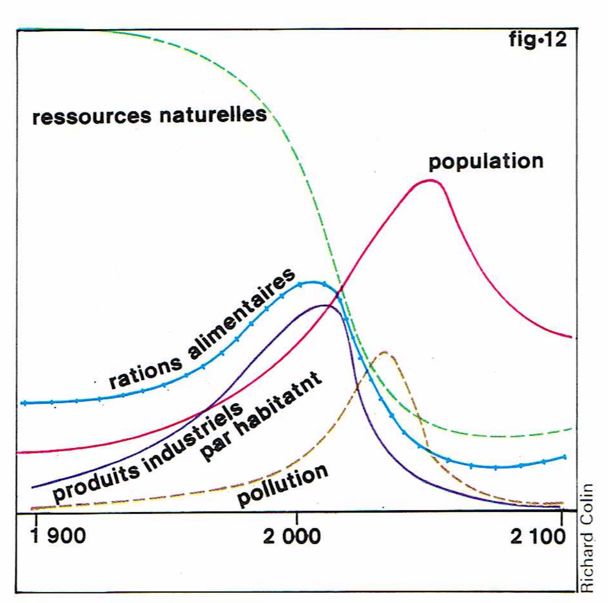
Le rapport du Club de Rome a maintenant cinq ans. Que s'est-il passé depuis sa parution ? Ce document a été évidemment très controversé, et après un long débat les experts admettent aujourd'hui que les modèles utilisés étaient trop simplistes pour pouvoir rendre compte de la complexité des phénomènes étudiés. Les conclusions étaient donc à tort extrêmement pessimistes. D'autre part, nous vivons aujourd'hui une réalité bien différente de celle qui était prévue. Il n'y a pas en effet de situation de pénurie de pétrole ; en revanche, les pays producteurs



Charliat - Rapho

▲ Une des conclusions du rapport Meadows : la prédiction du déclin des civilisations sous l'action conjuguée de la surpopulation, de la pollution et de l'épuisement des matières premières. Ici, un banc de poissons morts sur la Seine, Paris, octobre 1976.

▶ *Figure 12 : diagramme-type de croissance non contrôlée inspiré des travaux du Club de Rome. La croissance alimentée par la démographie et l'élévation du niveau de vie entraîne une diminution rapide des ressources naturelles et une augmentation de la pollution. Sous ces deux effets, un renversement de tendance brutal intervient au milieu du XXIe siècle, qui a pour conséquences une chute rapide de la population et son appauvrissement. Les résultats diffèrent suivant les hypothèses de croissance retenues mais l'évolution se termine toujours, plus ou moins tôt, par un épuisement des ressources naturelles et une crise alimentaire qui décime la population par une augmentation du taux de mortalité.*



ont pris conscience de leur situation de monopole et limitent volontairement leur production tout en essayant de tirer parti au maximum de leurs ressources en augmentant les prix.

Est-ce à dire que le rapport du Club de Rome était inutile? Tout donne à penser au contraire qu'il a permis le basculement des idées sur la croissance. Dans le domaine qui nous préoccupe, il faut reconnaître que toutes les économies des pays développés avaient assis leur développement sur une énergie bon marché, principalement tirée du pétrole. Certains experts avaient attiré l'attention des gouvernements et des responsables sur la fragilité extrême de cette croissance, mais comment résister à la facilité? Les opinions publiques n'étaient pas préparées à remettre en question l'essor rapide de nos sociétés, et ce n'est pas un des moindres mérites du rapport du Club de Rome que d'avoir proposé l'arrêt de la croissance dans ses formes actuelles.

Menacées d'embargo sur le pétrole qui est devenu une « arme politique », entravées dans le développement du nucléaire par des revendications écologiques, ne pouvant encore compter massivement sur de nouvelles formes d'énergie, les économies mondiales risquent-elles à l'avenir de rencontrer des difficultés dans leurs approvisionnements énergétiques?

Manquerons-nous d'énergie ?

Cette question a deux volets : d'abord, comment va évoluer la consommation, ensuite quelles ressources mettre en regard? Signalons tout de suite que cet ajustement n'est pas seulement quantitatif, car chaque forme d'énergie n'est pas indifféremment mobilisable pour toutes les utilisations : à titre d'exemple, citons le cas de l'électricité qui n'a pour l'instant pénétré que fort peu les transports individuels.

Nous fixerons à cet examen trois étapes : 1985, 2000 et la fin du XXIe siècle (au-delà de 2050). Le choix de ces dates s'explique aisément. Lors de la révision des politiques énergétiques survenue après le renchérissement brutal du prix de pétrole, tous les États ont pris 1985 comme première étape. Sur une dizaine d'années en effet, il n'était pas possible de modifier sensiblement la demande, et il fallait donc rapidement mettre en place les besoins pour la satisfaire. Les dés sont donc jetés aujourd'hui pour 1985. Pour l'an 2000, des décisions restent à prendre, mais les dés sont connus. Il faut entendre par là que les moyens technologiques nécessaires pour infléchir la demande (économies d'énergie par exemple) ou pour la satisfaire (nucléaire par exemple) font appel à des technologies existantes aujourd'hui. Le degré d'utilisation de ces moyens, c'est-à-dire leur « diversification », reste encore à décider.

Nous verrons très certainement apparaître des technologies nouvelles avant la fin du XXe siècle, comme des centrales électrogènes utilisant la fusion, mais il s'agira encore de réalisations expérimentales, et leurs poids dans la production sera très faible. Au-delà de 2050, les sources d'énergie utilisées aujourd'hui seront en grande partie épuisées, et la production d'énergie sera assurée par des moyens nouveaux. C'est l'objectif des chercheurs dans le domaine énergétique d'étudier ces futurs moyens dans les 30 ans qui viennent (*fig.* 13).

Voyons donc d'abord les besoins. Les analyses diverses donnent les chiffres suivants en T.E.P. (tonne-équivalent pétrole) :

1985 : 10 milliards de T.E.P.
2000 : 15 à 20 milliards de T.E.P.
2050 : de 70 à 100 milliards de T.E.P.

On peut faire sur ces chiffres les commentaires suivants.

Les besoins 1985 sont connus et incompressibles; au-delà, ils sont plus difficiles à apprécier et sont donc donnés par des fourchettes. Jusqu'à l'an 2000, les pays riches resteront les principaux consommateurs d'énergie. Actuellement les pays en voie de développement consomment moins de 10 % du total, et cette proportion pourrait atteindre 30 % vers l'an 2000. En 2050, on prévoit qu'une stabilisation de la population mondiale (quelque 10 milliards d'habitants) sera intervenue et que la consommation devrait se situer vers 70 milliards de T.E.P. Cette valeur représente sans doute un ordre de grandeur de la limite de la consommation mondiale d'énergie, limite qui serait donc atteinte avant une centaine d'années. Le second rapport du Club de Rome donnait pour la même époque une consommation trois fois supérieure environ, valeur jugée aujourd'hui totalement irréaliste.

Voyons à présent les ressources et commençons par celles nécessaires à la couverture des besoins jusqu'à l'an 2000 dont on a vu qu'elles seraient en quasi-totalité mises en œuvre par des moyens technologiques au point, sinon expérimentés aujourd'hui.

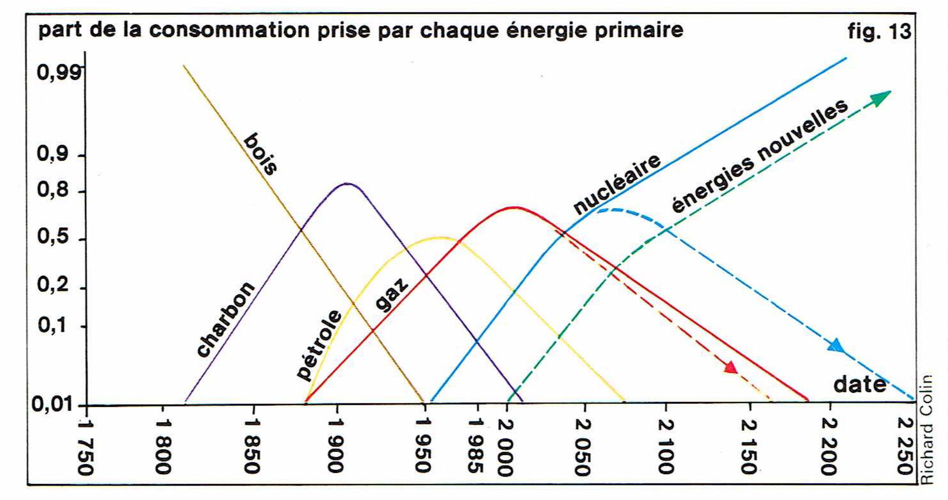
Faute de pouvoir augmenter la part :

— du charbon (environ 20 %) parce que son extraction et sa mise à disposition ne sont plus acceptables économiquement pour de très nombreux usages;

— de l'hydraulique (quelques %) très limitée par les coûts d'investissements et les conséquences écologiques;

— du nucléaire qui restera longtemps encore limité à la production d'électricité et qui, de ce fait, ne pourra pas dépasser 20 % des besoins mondiaux cumulés d'énergie; la plus grande part des besoins énergétiques proviendra des hydrocarbures, qui devront fournir plus de 60 % des besoins pendant cette période d'une trentaine d'années. Les réserves actuelles en pétrole et gaz naturel permettent de tenir jusqu'en 1990. D'ici là, les industries pétrolières doivent trouver de nouvelles ressources, et nous verrons plus loin qu'elles ont toutes les chances d'y arriver. L'inconnu est surtout d'ordre économique. Cela signifie que le coût des hydrocarbures restera élevé ou continuera à croître. Mais cette croissance du coût du pétrole aura pour conséquence de rendre compétitives d'autres sources naturelles d'énergie non rentables aujourd'hui. Ce sont les gisements de pétrole que l'on considère comme épuisés après seulement un prélèvement de 30 % environ des ressources, ce sont les schistes bitumineux, ce sont les gisements de charbon à faible teneur, etc. Les réserves de combustibles fossiles sont vraiment très

▼ *Figure 13 : introduction et substitution des différentes formes d'énergie primaire aux États-Unis. Ces différentes formes se remplacent progressivement les unes par les autres. L'introduction d'une énergie nouvelle (fusion ou/et solaire) en l'an 2000 entraînera la disparition progressive du gaz et du nucléaire.*



importantes et s'accroissent dès que l'on consent à monter les prix de revient.

Et le Soleil, dira-t-on? On connaît les caractéristiques de l'énergie dispensée par le Soleil, aussi largement distribuée que peu utilisée. Ses tares : faible quantité recueillie par m^2 et inconstance la destinent à un rôle d'énergie d'appoint. Avant l'an 2000, l'énergie solaire pourrait assurer 10 % de la couverture des besoins énergétiques, simplement dans les applications thermiques : chauffage et production d'eau chaude. Au-delà, on peut espérer utiliser davantage le rayonnement solaire par la mise en service de centrales solaires utilisant la voie thermique, par la production directe d'électricité (photopiles) et par la conversion bioénergétique (photosynthèse).

Que dire enfin du XXIe siècle? Ce sera celui de la stabilisation, démographique et sans doute énergétique. Le nucléaire qui, dans sa forme actuelle, ne résisterait pas longtemps faute de réserves, aura trouvé un second souffle dans la technique des surrégénérateurs. Au-delà de cette étape, on pense aujourd'hui que soit la fusion sera maîtrisée, soit l'énergie solaire totalement domestiquée. Le prix de l'énergie restera élevé, mais les réserves deviendront alors quasi inépuisables. Dans cette évolution, le nucléaire devra d'abord se substituer progressivement aux combustibles fossiles dans la production d'électricité, et c'est ce qui commence à se faire en France et dans la plupart des pays industrialisés. Ensuite, l'électricité d'origine nucléaire remplacera dans certaines applications les combustibles traditionnels. Le chauffage électrique est aujourd'hui l'exemple le plus marquant de ces remplacements présents et futurs. Enfin, l'électricité d'origine nucléaire ou solaire éliminera complètement les combustibles fossiles comme source d'énergie primaire soit par production de chaleur directe, soit par fabrication synthétique de combustibles. Dans ces mutations, l'hydrogène jouera un rôle sans doute déterminant, car il se prête remarquablement aux conversions d'énergie et, étant un gaz, se transporte aisément.

Que répondre en conclusion à la question posée au début de ce paragraphe sur la pénurie d'énergie? On peut être optimiste sûrement à court terme, pour les dix ans qui viennent, un peu moins pour l'an 2000. On a vu en effet que les hydrocarbures resteront la source principale d'énergie pour la fin du XXe siècle et même un peu au-delà. Cette situation laissera donc encore longtemps une situation de monopole aux pays producteurs. Mais ces pays ont besoin des ventes de leurs produits pétroliers pour assurer leur développement. Le problème n'est donc pas technique, mais politique. Il faut donc espérer que le marché des hydrocarbures fonctionnera sans à-coups. Mais, même dans cette hypothèse favorable, on sait que le rêve d'une énergie à profusion et bon marché se place dans le passé et non plus dans l'avenir. L'énergie est devenue une denrée précieuse, qu'il nous faut maintenant économiser avec soin.

A plus long terme, l'optimisme est réservé, car il nous faut préparer sans tarder les évolutions inéluctables qui vont se présenter, ce qui suppose de fantastiques recherches scientifiques et techniques.

La recherche aujourd'hui dans le domaine énergétique

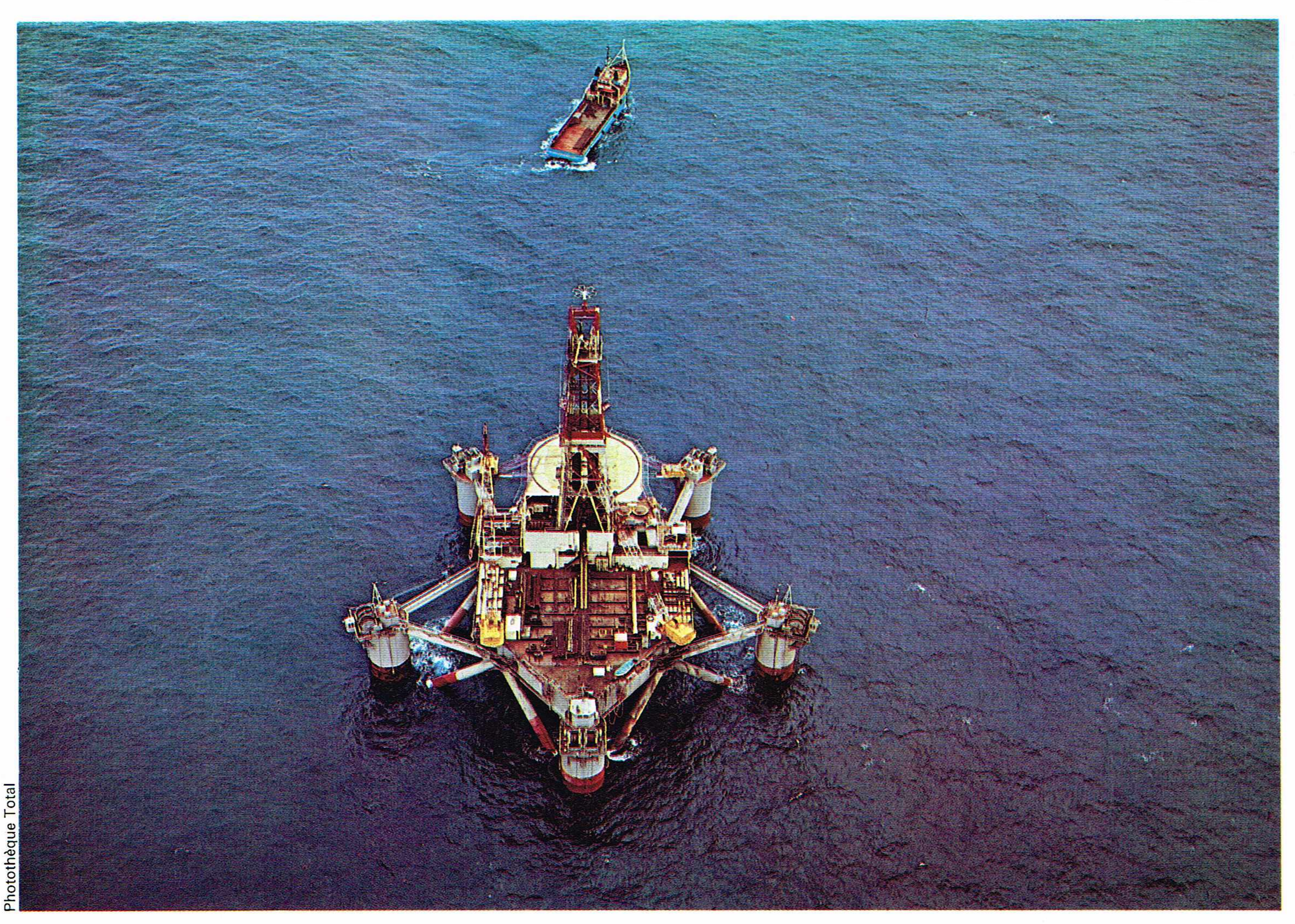
La recherche aujourd'hui se porte tout d'abord sur les sources traditionnelles d'énergie, puisqu'on sait que celles-ci occuperont encore longtemps les premières places. Pour les hydrocarbures, il faut citer la recherche pétrolière indispensable, qui se développe principalement sous la mer (off-shore). On s'intéresse de plus à la récupération du pétrole laissé (à proportion de 70 %) dans les puits épuisés. L'exploitation des hydrocarbures contenus dans les sables ou schistes bitumineux commence à prendre un intérêt économique, et les réserves sont ici considérables.

L'exploitation des mines de charbon verra dans les années à venir d'importantes mutations : extraction automatique, gazéification du charbon au fond de la mine. La transformation du charbon en gaz ou en pétrole dans des usines de surface devrait démarrer en 1980.

Le nucléaire, on le sait, fait l'objet d'importantes recherches aussi bien dans les solutions aujourd'hui courantes — eau légère et enrichissement de l'uranium — que dans les surrégénérateurs.


Rapho

▲ *Que dire enfin du XXIe siècle? Ce sera celui de la stabilisation démographique et sans doute énergétique. Ici, une rue de Calcutta, aujourd'hui.*



Photothèque Total

▲ *La recherche aujourd'hui se porte tout d'abord sur les sources traditionnelles d'énergie. La recherche pétrolière, notamment, se développe principalement sous la mer. Ici, une plate-forme de forage off-shore.*

L'énergie solaire commence à prendre une part notable des crédits de recherche. Le champ est immense, aussi grand que les espoirs qu'on peut nourrir au sujet de cette énergie.

Signalons pour mémoire la géothermie qui fait l'objet dans de nombreux pays de réalisations pilotes. Naturelle ou artificielle, la géothermie devrait se tailler une place non négligeable dans les énergies d'appoint.

Enfin, pour la fusion, source d'énergie pour le XXIe siècle, on en est encore au stade des études préliminaires, et la recherche est de ce fait activement poussée dans le cadre d'organisations internationales. Les objectifs actuels sont une centrale expérimentale en 1990, des réacteurs commerciaux en 2010-2020.

Les recherches se poursuivent aussi très activement dans tout le domaine de l'électricité, qui sera dans le futur le vecteur énergétique prépondérant : transport (très haute tension, câbles supraconducteurs), stockage, distribution et applications nouvelles.

Signalons pour clore ce chapitre quelques projets ambitieux, malheureusement inaccessibles aujourd'hui dans l'état de notre technologie : récupération de l'énergie contenue dans l'atmosphère, utilisation de la rotation de la Terre et de son champ magnétique, absorption de l'énergie du rayonnement cosmique (neutrinos), captation de l'énergie solaire par un satellite à très haute altitude, d'une surface de 50 km^2 et transmettant vers la Terre l'énergie recueillie par micro-ondes électromagnétiques (projet Glaser), etc.

Toutes ces recherches, les plus traditionnelles comme les plus avancées, vont demander beaucoup de moyens tant humains que matériels. Une bonne coordination entre la recherche fondamentale, le développement technologique et les études industrielles est nécessaire. Une coopération internationale est hautement souhaitable. L'information très poussée du public est indispensable pour que nous puissions préparer et dominer notre avenir plutôt que le subir, car énergie et société sont, en douterait-on à présent, étroitement liées.

▶ **Frank Zarb** *(au premier plan), administrateur de la* **Federal Energy Administration** *(Washington, U. S. A.), annonce la création d'une organisation chargée du développement commercial des sources énergétiques non conventionnelles (10 octobre 1975).*

J. Tiziou - Sygma

BIBLIOGRAPHIE

Enquête sur les ressources mondiales, 1974 : Conférence de Londres sur l'énergie. - *Energy and man,* I.E.E. Press. Inc, New York.

CONVERSION DE L'ÉNERGIE

Nécessité de la conversion de l'énergie

La notion d'énergie est aujourd'hui largement répandue dans le public. Chacun sait, depuis la crise de 1974, que l'énergie est la principale richesse économique. Produit de base, l'énergie se vend, se transporte, se stocke et se transforme. Sa valeur est périodiquement réévaluée. L'énergie est présente dans tous les détails de notre vie et sa disparition occasionnelle se traduit toujours par des conditions gênantes, sinon néfastes pour les populations.

Très utile pour comprendre notre monde physique, l'énergie reste, en dépit de ses aspects familiers et pratiques, une notion abstraite. Personne ne peut la voir, ni la toucher. On a déjà noté que c'est lors de ses transformations qu'elle se manifeste.

L'énergie et ses différentes formes

Lorsque l'on parle d'énergie, on fait appel à des notions souvent très différentes. Aussi est-il important de bien distinguer les différents aspects de l'énergie.

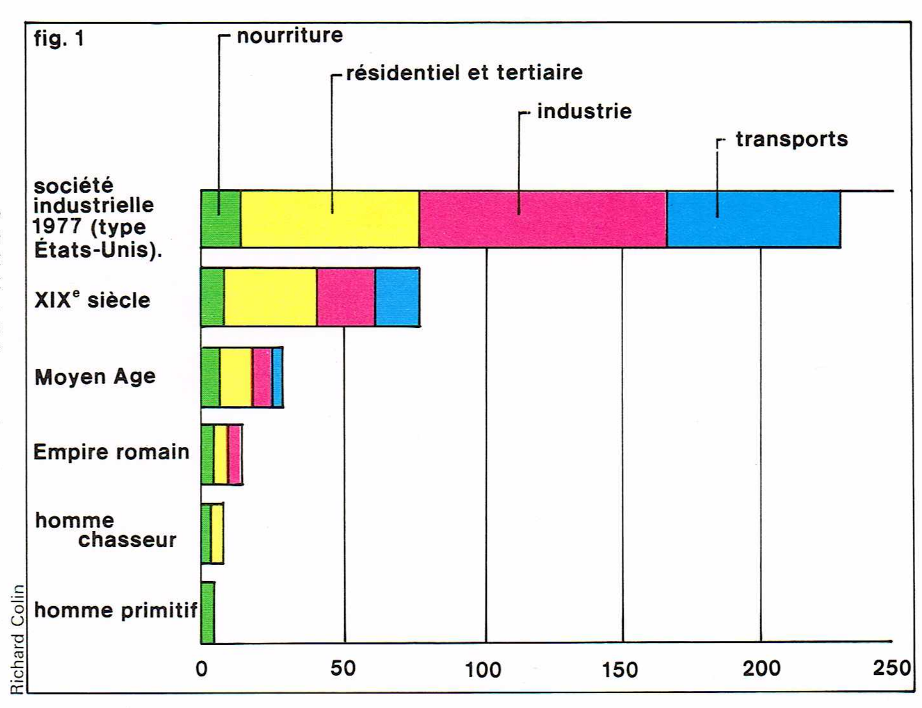
Le physicien considère que l'énergie se présente essentiellement sous deux formes : d'une part l'*énergie cinétique* ou énergie associée au déplacement d'un corps, et d'autre part l'*énergie potentielle* associée à la position d'un objet dans un champ de force (la pesanteur par exemple). Le véhicule en mouvement (énergie cinétique) et la masse d'eau d'un barrage hydraulique (énergie potentielle) peuvent illustrer ces deux formes de l'énergie.

L'économiste et l'homme politique s'intéressent davantage aux sources de l'énergie dite primaire. On sait que 99 % de l'énergie utilisée par l'homme aujourd'hui provient de cinq sources primaires : pétrole, gaz naturel, charbon, énergie hydraulique et énergie nucléaire.

L'ingénieur quant à lui s'intéresse surtout aux différentes formes que prend l'énergie au cours de ses transformations. On a vu que ces formes sont essentiellement au nombre de six : l'énergie mécanique, l'énergie électrique, l'énergie thermique, l'énergie chimique, l'énergie rayonnante et l'énergie nucléaire.

Ces différentes façons de considérer l'énergie ne sont pas contradictoires. Il est facile de montrer par exemple que les différentes formes d'énergie de l'ingénieur ne sont que des manifestations de l'énergie cinétique ou de l'énergie potentielle du physicien. L'énergie d'un gaz contenu sous pression dans une bouteille provient de l'énergie cinétique des molécules de ce gaz. La chaleur a également pour origine l'agitation des molécules ou des atomes du corps considéré. L'énergie produite ou absorbée pendant une réaction chimique provient du réarrangement des structures moléculaires, ce qui modifie l'énergie potentielle des électrons qui entrent en jeu dans la réaction.

On appelle conversion de l'énergie le passage d'une forme d'énergie à une autre. Les procédés de conversion sont du domaine de l'ingénieur et nous allons donc examiner comment les six formes d'énergie citées ci-dessus peuvent être converties d'une forme dans une autre. Mais il nous faut auparavant examiner un dernier aspect du problème de l'énergie : celui de ses utilisations.



▲ *Figure 1 : évolution de la consommation énergétique à travers les âges (en 1 000 kcal par tête et par jour).*

Les différentes utilisations de l'énergie

Structure globale de la consommation d'énergie

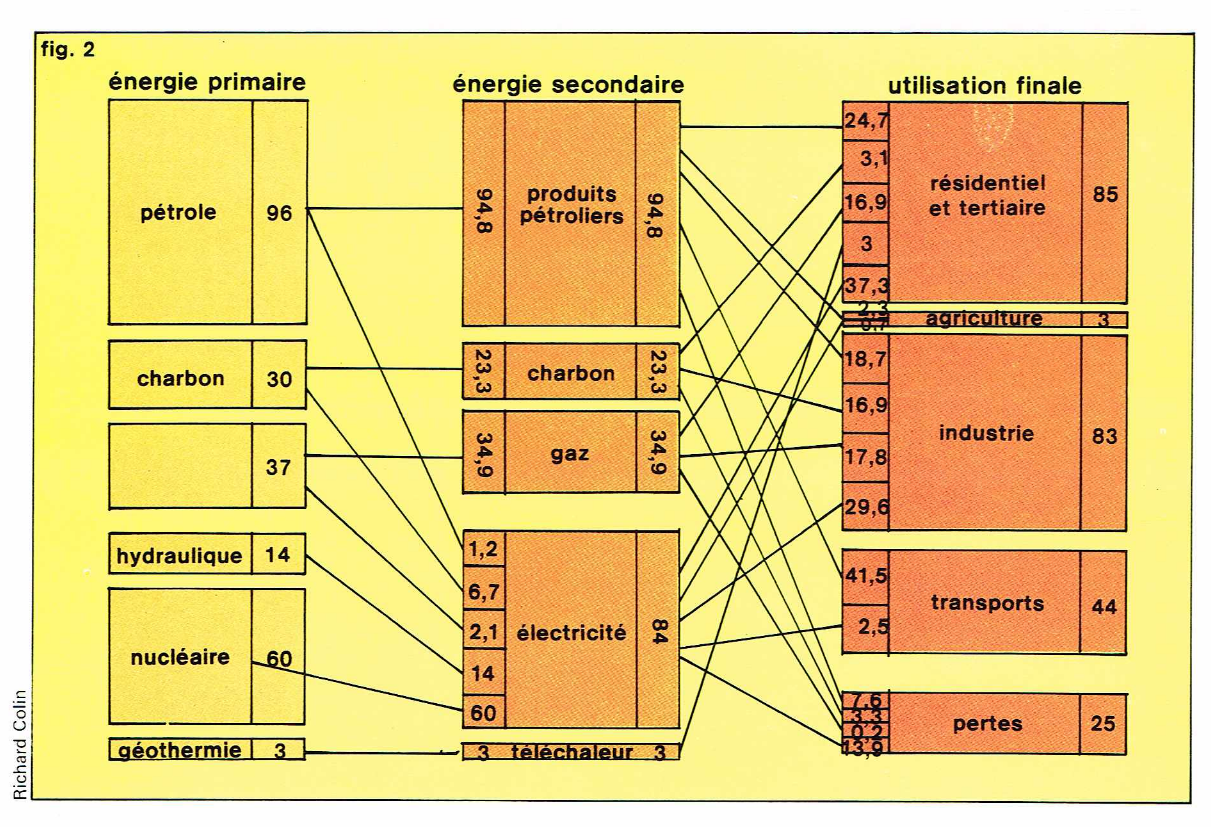
La croissance de la consommation d'énergie a été examinée aux différentes étapes du développement de l'humanité (voir *fig.* 1).

L'homme primitif ne disposait en matière d'énergie que de sa seule nourriture, environ 2 000 kcal par tête et par jour. Cette valeur a été doublée avec l'utilisation du feu, et, grâce à l'agriculture, l'homme primitif a pu dépasser les 10 000 kcal par tête et par jour. Pendant la révolution industrielle, ce chiffre est monté à 70 000 kcal, pour dépasser aujourd'hui dans les pays très industrialisés 200 000 kcal par tête et par jour.



CAT - Cedri

◀ *L'homme primitif ne disposait en matière d'énergie que de sa seule nourriture, environ 2 000 kcal par tête et par jour.*



▶ Figure 2 : prévision du bilan énergétique de la France en 1985 : 240 M. T. E. P. (mégatonne-équivalent pétrole).

La croissance extrêmement rapide depuis un siècle de la consommation d'énergie a été alimentée essentiellement par la croissance industrielle et les transports. Aujourd'hui, en France, les grands secteurs d'utilisation de l'énergie que l'on peut ramener à trois sont, par ordre d'importance :

— l'*industrie,* qui a consommé en 1972 40 % de la totalité de l'énergie primaire ;

— le *secteur résidentiel et tertiaire* à usage domestique : 39 % ;

— les *transports :* 21 %.

La tendance que l'on constate aujourd'hui est celle d'une réduction de la consommation de l'industrie résultant d'une amélioration des rendements et du développement relatif plus rapide des deux autres secteurs de consommation, en particulier celui du résidentiel et du tertiaire.

Besoins spécifiques des secteurs de consommation

Si on examine à présent comment chaque secteur consomme l'énergie dont il a besoin, on s'aperçoit que chacun d'eux a des besoins spécifiques et que, pour les satisfaire, chaque secteur fait appel à différentes formes et à différentes sources d'énergie. Prenons le cas par exemple du secteur résidentiel et tertiaire qui a de gros besoins de chauffage. Pour satisfaire ces besoins, il sera fait appel à l'électricité, d'une part, et à tous les combus-

Tableau I
Conversion d'énergie

Énergie de départ ↓ / Énergie d'arrivée →	Mécanique	Électrique	Calorifique	Chimique	Rayonnante
Mécanique		Tribo-électricité Piézo-électricité Dynamo Alternateur	Frottement Machines frigorifiques Pompes à chaleur	Réactions provoquées par compression	Triboluminescence
Électrique	Moteurs électr. Pompes à métaux liquides		Effet Joule	Électrolyse	Électroluminescence
Calorifique	Moteurs thermiques	Thermo-électricité		Réactions endothermiques (cracking)	Incandescence
Chimique		Piles Accumulateurs Piles à combustible	Réactions exothermiques (combustion en particulier)		Chimio-luminescence
Rayonnante	Radiomètre	Photo-électricité	Absorption	Photochimie : – photosynthèse – photographie – photolyse	
Nucléaire			Fission et fusion nucléaires	Transformation des éléments radio-actifs	Radio-activité naturelle et artificielle

Richard Colin

▶ Tableau I : ce tableau présente les principales possibilités de conversion d'une forme d'énergie dans une autre, en indiquant pour chaque type de conversion le principe physique de base ou le convertisseur utilisés. A noter que l'énergie nucléaire, en raison de sa nature particulière, ne figure pas dans l'énergie d'arrivée.

tibles habituels : fuel-oil, gaz naturel et charbon d'autre part. De plus, la géothermie et l'énergie solaire commencent à prendre place sur ce marché.

Il résulte de ces imbrications entre les besoins, les formes d'énergie utilisées pour les satisfaire et les sources primaires d'énergie auxquelles on a recours une situation complexe difficile à décrire. La *figure* 2 donne une image de ce que sera la situation française en ce domaine au milieu de la prochaine décennie.

Il faut noter que cette complexité est inévitable. Les sources d'énergie sont utilisées dans un marché concurrentiel. Chaque forme d'énergie a de plus ses avantages et ses inconvénients ainsi que chaque procédé de conversion. Il en résulte un grand nombre de possibilités qui sont présentées au choix des particuliers ou des entreprises. Cette situation permet à chacun de tirer parti au maximum de la richesse des moyens dans ce domaine de l'énergie au sein d'une nécessaire planification nationale destinée à éviter les abus et les gaspillages.

Conversions des énergies

On sait que chacune des six formes prises par l'énergie peut être convertie en principe en une quelconque des cinq autres formes. Ceci ne veut pas dire que toutes ces conversions sont équivalentes et aussi faciles à réaliser les unes que les autres. On verra au contraire qu'il en va très différemment.

Le *tableau* I montre toutes les conversions qu'il est théoriquement possible de faire. Il faut noter qu'une conversion, lorsqu'elle est possible, peut être réalisée en faisant appel à différents procédés. Chacun sait par exemple qu'il existe de nombreux types de moteurs à combustion interne transformant l'énergie chimique du combustible en énergie mécanique.

Critères de choix d'un système de conversion d'énergie

Comme nous venons de le voir, chaque utilisateur devra pour résoudre ses problèmes énergétiques faire un choix entre différents procédés de conversion. Pour le consommateur individuel, il lui faudra choisir par exemple entre une cuisinière électrique ou une cuisinière à gaz, entre un véhicule équipé d'un moteur à explosion et un véhicule équipé d'un moteur Diesel. Dans le premier de ces exemples, il doit choisir entre une conversion énergie chimique/énergie thermique ou une conversion énergie électrique/énergie thermique. Dans le second exemple, il doit, pour une même conversion énergie chimique/énergie mécanique, choisir entre deux types de convertisseurs.

Les critères de choix entre différents procédés de conversion ou différents convertisseurs seront, dès que les puissances et donc les consommations d'énergie se feront notables, d'ordre économique. C'est le coût global (investissement et frais de fonctionnement) qui sera le paramètre de choix. Dans ce coût pèseront lourdement le rendement de la conversion et le prix de l'énergie de départ. Mais d'autres considérations pourront également jouer un rôle important : les conditions d'exploitation, la compacité de l'installation, la facilité d'entretien, les conditions d'approvisionnement en énergie de départ, etc. Pour revenir à la cuisinière à gaz ou électrique, il est certain que beaucoup d'usagers choisissent leur modèle en fonction de leurs *habitudes* et non au vu de calculs économiques. Dans certaines applications industrielles interviennent assez souvent des considérations de *sûreté de fonctionnement* qui compliquent alors beaucoup le problème. Le choix des systèmes de conversion devient alors une question très difficile qui demande tout le savoir-faire de bureaux d'études spécialisés.

Examen des différents procédés de conversion

Au terme de cette introduction, le lecteur aura senti sans aucun doute toutes les difficultés qui apparaissent dès que l'on veut présenter les différents procédés de conversion et les convertisseurs qui les mettent en œuvre.

On ne peut classer en effet les convertisseurs à partir des utilisations, puisque chaque secteur d'utilisation utilise bien souvent les mêmes types de convertisseurs. Prendre comme éléments de classement les énergies primaires ou secondaires ne conviendrait pas davantage, puisqu'une même famille de convertisseurs est souvent à même d'utiliser des combustibles très différents. Énumérer les différents types de conversion dans une liste qui se voudrait exhaustive semblerait enfin donner à chaque conversion le même poids, ce qui est contraire à la réalité. Certaines conversions sont en effet très utilisées quotidiennement, alors que d'autres en sont encore au stade du développement ou même du laboratoire.

Pour tourner cette difficulté, il est proposé de structurer la description des différents convertisseurs d'énergie suivant trois axes principaux qui correspondent à différentes voies de développement de notre monde technologique. C'est ainsi que l'on examinera les conversions de ce qui a été appelé la « civilisation de la vapeur », ensuite celles de la « civilisation des transports » et de la « civilisation de l'électricité ».

On trouvera ci-après quelques remarques générales sur ces différentes étapes, avec une présentation de la « civilisation de l'hydrogène » que nous connaîtrons peut-être un jour. On essayera de corriger chemin faisant par des notes complémentaires les imperfections que ce plan laisse encore subsister.

Priorité technologique des transformations d'énergie primaire en énergie thermique : la « civilisation de la vapeur »

Rôle de l'eau dans le développement industriel

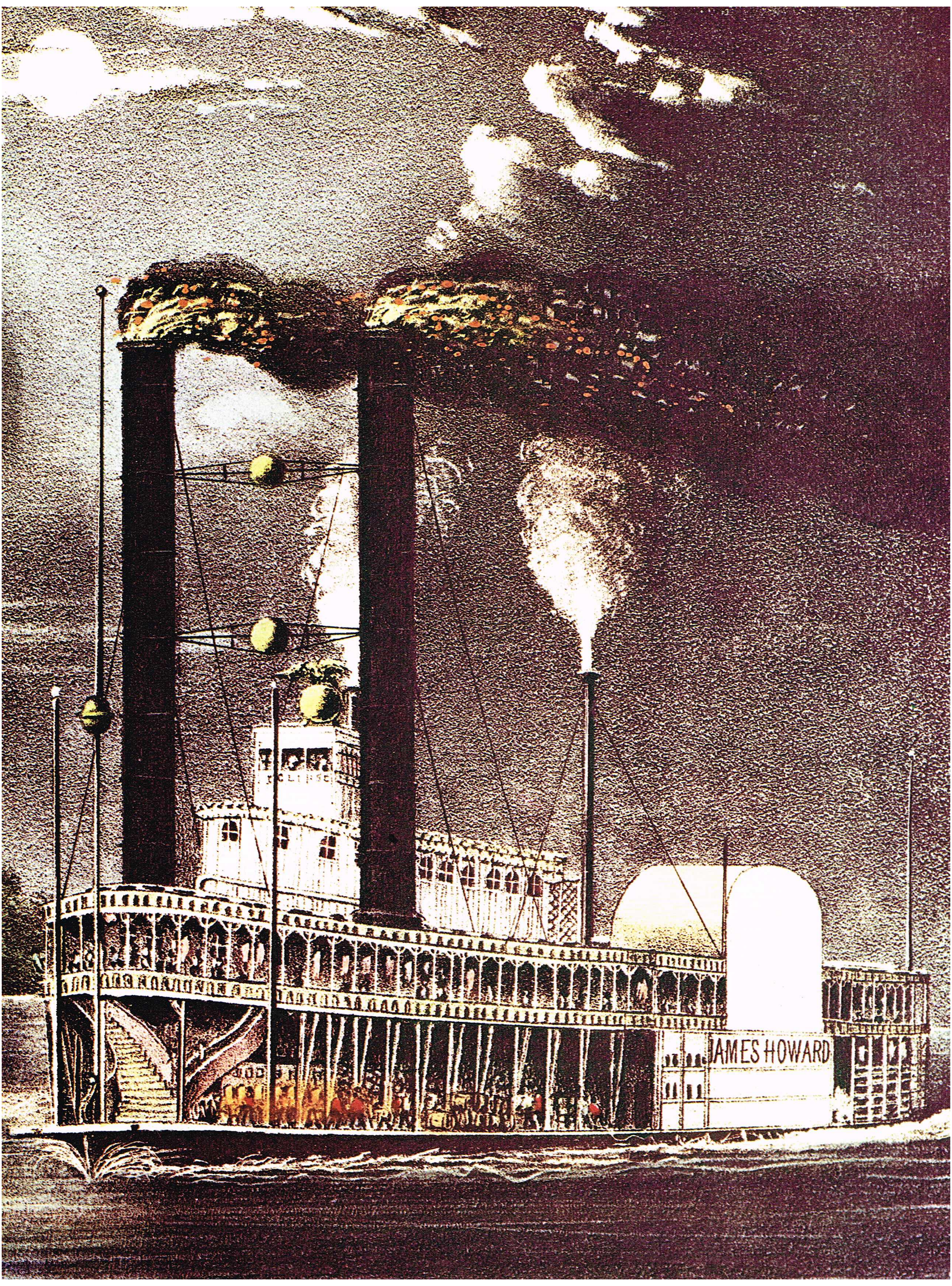
Il est banal d'insister sur le thème de l'eau « source de vie ». Sans eau, la vie n'aurait pu apparaître sur la Terre, s'y développer et s'y maintenir. Aujourd'hui, devant l'état de certaines de nos sources ou de nos rivières, nous mesurons l'importance du rôle de l'eau sur notre planète et les dangers que fait courir sa pollution.

Moins connues, sans doute, sont les qualités de l'eau comme fluide énergétique. L'eau possède en effet une chaleur spécifique (1 cal/g °C à 20 °C) et une chaleur de vaporisation très élevée (639 cal/g à 100 °C) bien supérieures à celles de la plupart des liquides. Cela lui permet de stocker sous forme de liquide et de vapeur de grandes quantités de chaleur qu'elle est ensuite susceptible de restituer. C'est de plus un excellent fluide de travail thermodynamique, même si son volume spécifique à basse température est élevé. Rappelons qu'un volume d'eau transformé en vapeur à la pression atmosphérique occupe un volume 1 700 fois plus considérable.

Si on ajoute à ces qualités le fait que l'eau est liquide aux conditions normales de température et de pression, qu'elle se manipule et se stocke sans difficulté, qu'elle existe en abondance à la surface du globe, on s'apercevra que l'eau et sa vapeur avaient toutes les qualités nécessaires pour permettre la réalisation de la plupart des rêves des thermiciens du XIXe siècle et du XXe siècle.

La vapeur qui a absorbé la chaleur de combustion, aux pertes près, dans un générateur appelé communément *chaudière* peut être utilisée soit comme fluide de chauffage, soit comme fluide de travail dans des machines thermiques. Les chaudières ont commencé par brûler du bois, ensuite du charbon, aujourd'hui du fuel, du gaz ou de l'uranium, mais de façon très générale, c'est sous forme de vapeur d'eau que la chaudière restituait et restitue encore aujourd'hui la chaleur provenant de la conversion d'énergie.

Est-ce à dire que la vapeur d'eau a acquis une place qui ne lui sera jamais contestée ? En fait, l'eau se trouve déjà écartée de tout le domaine des basses températures, car il existe d'autres fluides comme le fréon et l'ammoniac qui ont des caractéristiques beaucoup mieux adaptées aux cycles frigorifiques. De la même façon, elle ne peut pas lutter dans le domaine des hautes températures où ses caractéristiques de pression de vapeur sont très gênantes. A partir de 374 °C où la pression de la vapeur est de 220 bars, la vapeur d'eau se comporte comme un gaz. Si on compare cette situation à celle du sodium qui bout à la pression atmosphérique à 883 °C, on comprend aisément l'engouement pour le sodium comme


JAMES HOWARD



C. Raimond - Dityvon - Viva

◀ *Une centrale thermique près de Lens (Nord) : la production d'énergie électrique se fait ici à partir d'énergie thermique de combustion utilisant les déchets de la production charbonnière.*

fluide caloporteur dans certaines chaudières nucléaires (surrégénérateurs).

Parmi les concurrents, aussi bien dans les domaines thermomécaniques que purement thermiques, le plus sérieux est peut-être l'électricité. La traction électrique dans les transports par voies ferrées a tué les locomotives à vapeur; le chauffage électrique sous ses différentes formes est en train de remplacer les traditionnelles installations de chauffage central à eau chaude ou à vapeur.

Malgré les domaines interdits et ceux qui se ferment à elle, l'eau restera en bonne place pour longtemps encore dans les procédés de conversion qui mettent en jeu l'énergie thermique. Les centrales nucléaires d'aujourd'hui et de demain l'utilisent et l'utiliseront. Elle restera de plus le fluide pour transporter et échanger des calories dans la gamme moyenne de températures (20 à 210 °C). Ses caractéristiques physiques adaptées et une technologie d'un haut degré de perfectionnement sont ses meilleurs atouts.

Besoins en énergie thermique

La vapeur est utilisée principalement :

— pour le chauffage;

— pour la production d'énergie mécanique; elle est en outre utilisée pour quelques usages très spéciaux en pétrochimie.

Comme fluide chauffant, la vapeur généralement saturée est utilisée à des températures ne dépassant pas 210 °C, ce qui correspond déjà à une pression de 20 bars environ, car au-delà la pression devient excessive pour ce type d'application. Les opérations couramment effectuées appartiennent aux procédés du génie chimique ou biochimique :

— traitements physiques : séchage, évaporation, distillation;

— traitements chimiques : modification des vitesses de réaction;

— traitements biologiques : stérilisation, pasteurisation.

Cette vapeur basse pression peut enfin servir au chauffage des locaux.

Pour la production d'énergie mécanique, il est nécessaire d'augmenter les caractéristiques de la vapeur de façon à augmenter les rendements des cycles thermiques utilisés et on travaille le plus souvent en vapeur surchauffée à des pressions beaucoup plus fortes qu'en chauffage. Les moteurs qui transforment l'énergie thermique de la vapeur en énergie mécanique sont de deux types : les machines alternatives à piston et les turbines, ces dernières ayant aujourd'hui supplanté les premières. La gamme de puissance des générateurs de vapeur et des turbines associées va selon les applications de quelques MW à plus de 1 000 MW.

Il n'est pas facile de donner une évolution détaillée des besoins en énergie thermique d'un pays industrialisé comme la France; les statistiques habituellement publiées ne le permettent pas. Mais ces besoins sont très importants, la plus grande partie des combustibles fossiles étant destinée à des applications thermiques. Pour ne citer qu'un exemple, l'E. D. F. a brûlé en 1973 25,4 millions de tonnes de pétrole, ce qui représentait 22 % du pétrole importé en France cette année-là. On peut penser que c'est presque 50 % de l'énergie primaire consommée qui sont utilisés pour des applications thermiques.

Production de chaleur

Les appareils habituellement connus pour produire de la chaleur sont les *chaudières*. Elles sont constituées d'un *foyer* où le combustible est brûlé et d'une *surface de chauffe* qui permet de transférer la chaleur dégagée par la combustion à un liquide ou un gaz. Lorsque le fluide chaud produit par la chaudière est de la vapeur, on utilise aussi le terme de *générateur de vapeur*.

Les chaudières brûlent habituellement des combustibles fossiles, mais la terminologie a été étendue à l'énergie nucléaire. On emploiera donc le terme de *chaudière nucléaire* qui se compose d'un *réacteur* (assimilable au *foyer*) et de *générateurs de vapeur*. Lorsqu'une chaudière n'a pas de foyer et utilise des gaz ou des fumées produits ailleurs, on utilise alors le terme de *chaudière de récupération*.

On aura noté que les chaudières sont par définition des appareils dans lesquels s'effectue la conversion d'une certaine forme d'énergie (chimique, nucléaire, électrique ou rayonnante) en énergie thermique. Ce sont donc de véritables convertisseurs. Les appareils qui transforment de l'énergie thermique en énergie thermique portent d'autres noms : échangeurs, préparateurs, etc., et seront examinés ultérieurement au chapitre concernant les transformations d'énergie.

Ce chapitre consacré à l'énergie thermique portera donc sur les chaudières, dont le but essentiel, comme on l'a vu, est la production de vapeur : chaudières classiques d'abord, chaudières nucléaires ensuite.

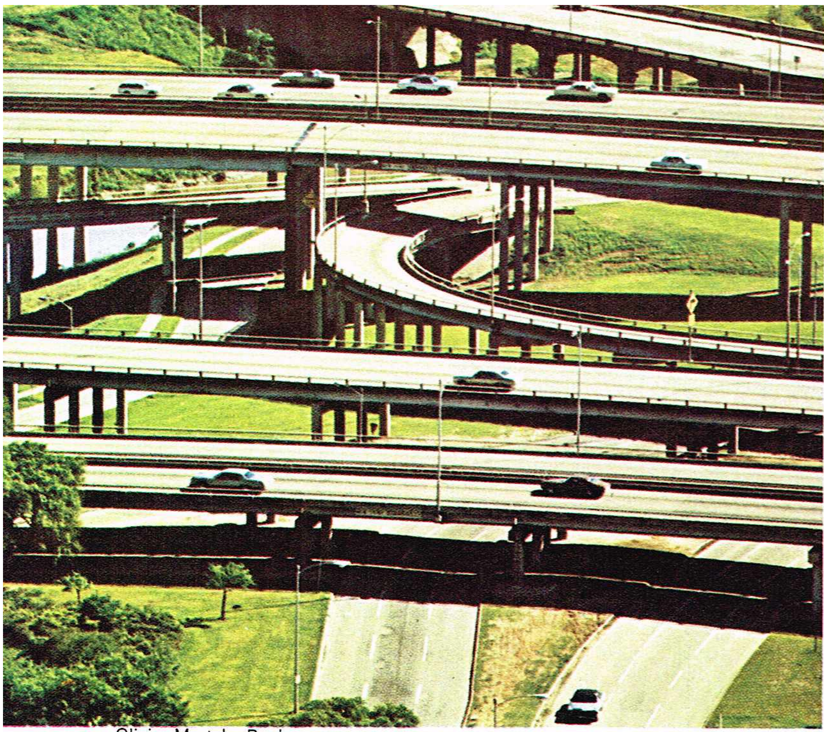
Enfin seront décrits rapidement des convertisseurs thermiques utilisant l'énergie électrique ou l'énergie rayonnante du Soleil.

Priorité de la conversion thermomécanique : la « civilisation des transports »

La part d'énergie absorbée par le secteur des transports est tout à fait considérable puisqu'il représente les 2/5 du total de la consommation... On pourrait évidemment penser que cette énergie est dépensée en pure perte puisque les transports ne créent pas directement des biens réels. Il n'en est rien, car les transports sont absolument nécessaires au fonctionnement d'une société industrielle. Les matières premières comprenant en particulier l'énergie

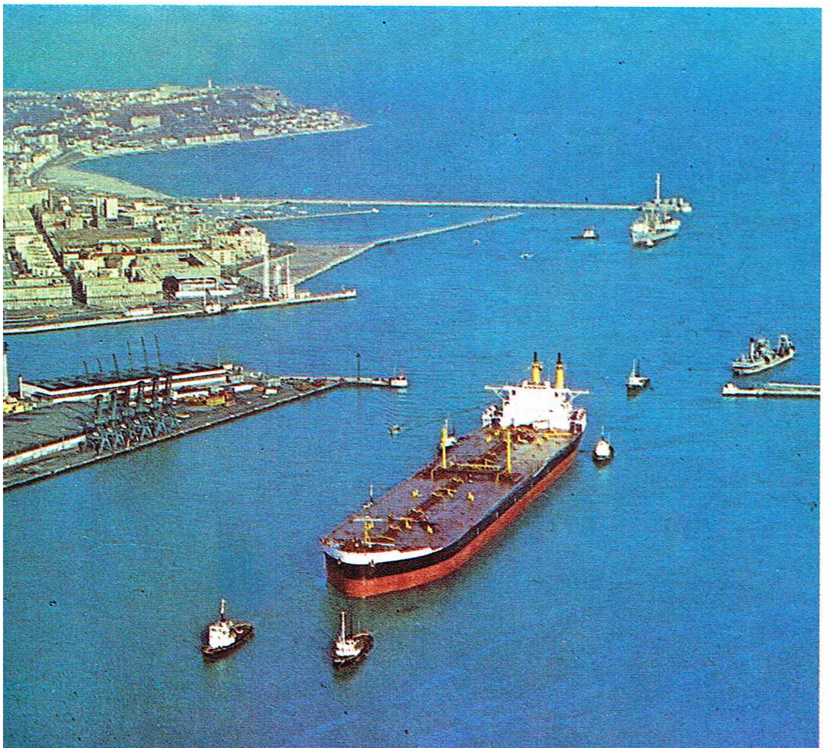
◀ *Page ci-contre, le* **James Howard**, *navire à vapeur remontant le Mississippi en 1875.*

Snark International



Olivier Martel - Rapho

Silvester - Rapho



Photothèque Total



G. Gerster - Rapho

▲▼ ***Les moyens de transport sont nombreux et se classent habituellement en quatre grandes familles (ci-dessus) : route (Houston, Texas), fer (le train le plus rapide du monde, Japon), eau (pétrolier géant dans le port du Havre) et air (premier vol du Jumbo Jet, États-Unis).***
A ceci, il faut rajouter deux rubriques (ci-dessous) : celle des transports spéciaux (pipe-line pour l'eau, Qatar) et celle des transports urbains (métro de Milan, Italie).

Marc Riboud - Magnum

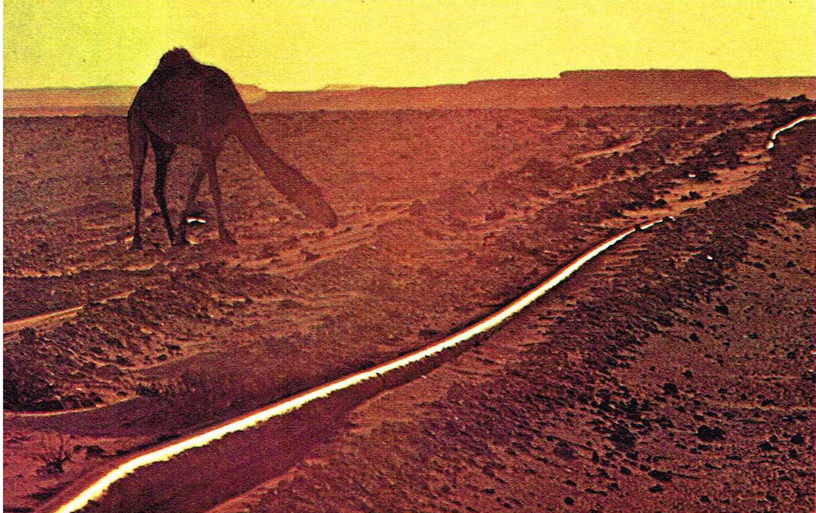




Photo M.M.

et la main-d'œuvre doivent être rassemblées dans les lieux de production et les produits doivent être acheminés par des réseaux de distribution vers les points de consommation. Une analyse plus fine du fonctionnement de nos sociétés montrerait qu'il existe différentes causes secondaires qui justifient également des moyens de transport très développés : citons la division du travail, la sous-traitance, la coopération internationale, etc.

Si les transports se sont développés d'une façon considérable depuis deux siècles, le besoin de déplacer les personnes et les biens existe depuis la plus haute antiquité. Au début, le seul moyen de locomotion était la marche à pied et le transport se faisait à dos d'homme, ce qui limitait les échanges. La lenteur des transports et leur précarité ont entraîné le développement des transports sur l'eau. Mais là encore, bien que l'usage de la voile soit apparu très tôt, la plupart des navires étaient des galères encore propulsées par l'énergie humaine.

L'invention du bât permit, en utilisant la traction animale, de développer les voies terrestres. On connaît aussi l'imagination des Romains pour bâtir les aqueducs ou des égouts pour le transport des fluides. Mais, par l'utilisation des seules forces humaines et animales, les techniques de transport ne pouvaient évoluer, ce qui explique que seuls les transports maritimes qui pouvaient disposer de l'énergie du vent aient connu au cours des siècles des développements notables.

L'arrivée de la machine à vapeur au XIXe siècle bouleversa les techniques de transport sur terre et sur mer. Avec le XXe siècle commença le règne de l'automobile et des transports routiers. Le transport aérien se développa très rapidement après la Seconde Guerre mondiale.

Dans ce prodigieux développement des transports, la contribution des différents moyens de locomotion a constamment évolué, mais, même si aujourd'hui la structure des moyens de transport se modifie encore, nous devons constater une augmentation persistante du trafic mondial.

Terminons cette introduction en remarquant que les réseaux de transport et les possibilités des moyens utilisés matérialisent un contrôle de l'espace géographique et qu'à ce titre ils participent à la puissance et au rayonnement des pays qui les possèdent.

Les transports sont donc un élément primordial des économies nationales. Leur importance dépasse de ce fait les frontières. Aujourd'hui, pour cette raison, il existe des instances internationales qui régissent et ordonnent l'exploitation de chacun des grands moyens de transport.

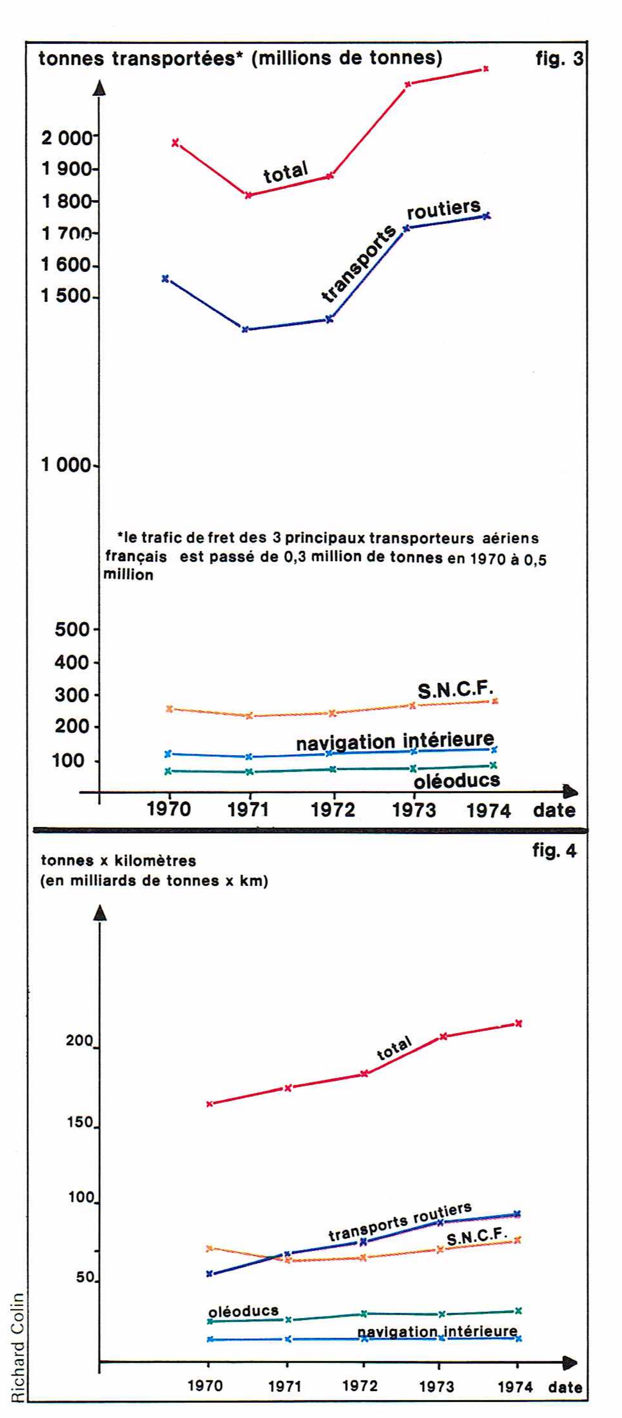
Les techniques de transport

Les moyens de transport sont nombreux. Ils sont aussi bien connus du public, tant leur usage est répandu dans nos sociétés modernes. Ils se classent habituellement en quatre grandes familles sous les appellations lapidaires : route, fer, eau et air. Pour être tout à fait complet, on peut inclure l'astronautique avec l'aéronautique, bien que les vols spatiaux se déroulent principalement en dehors de l'atmosphère, et il faut rajouter deux rubriques : celle des transports urbains qui forment une famille à part et celle des transports spéciaux dans lesquels on trouve les conduites, transport par bandes ou câbles, etc.

Comment participent, en France, ces différents moyens aux transports des personnes et des marchandises ? On trouvera pour les marchandises la réponse à cette question dans les *figures* 3 et 4.

On constatera que le transport aérien reste encore marginal. Pour les marchandises, le « fer » fait jeu égal avec la « route », ces deux moyens de transport assurant 80 % du trafic. Les transports fluviaux restent le parent pauvre, alors que le transport par pipe-line tient une place notable. Pour les personnes, la grande majorité des transports, soit 80 % environ, est assurée par la route. Notre époque est bien celle de l'automobile.

Les principales techniques utilisées par chacun des moyens de transport sont présentées dans le *tableau* II. Comme on le voit, il n'existe pas, exception faite de l'astronautique, de moteurs spécifiques à chacun des moyens de transport. Le moteur Diesel par exemple est utilisé aussi bien sur route, sur rail, que sur mer et canaux. C'est un type de moteur performant et économique dont les qualités d'adaptation lui permettent de trouver sa place aussi bien sur un camion que sur une locomotive

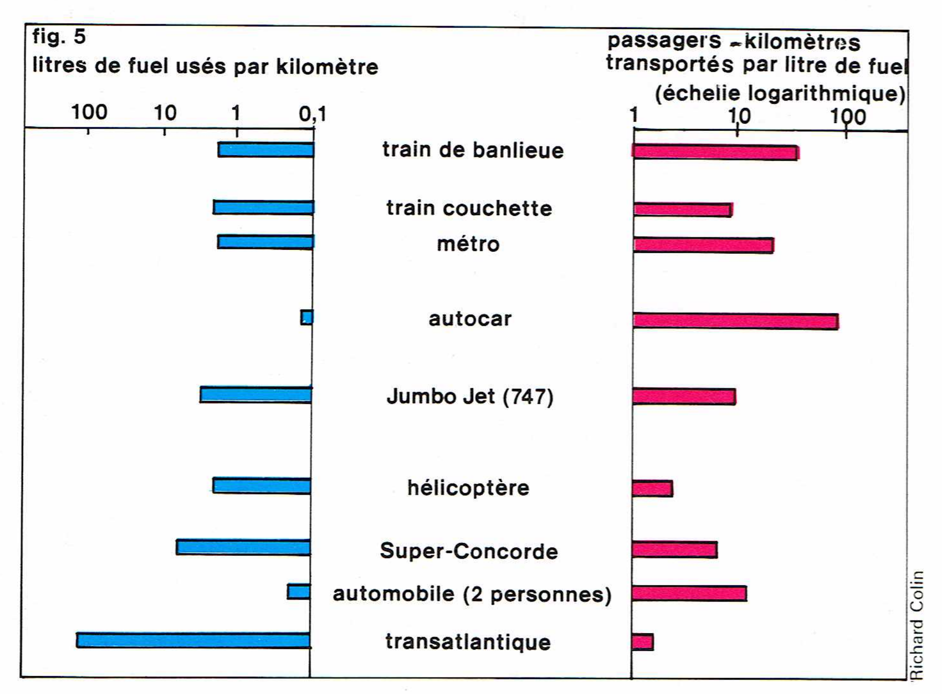


◀ ***Évolution en France, de 1970 à 1974, du transport des marchandises : tonnage (figure 3) et tonnes × kilomètres (figure 4).***

▼ ***Tableau II : les principales techniques utilisées pour chacun des quatre grands moyens de transport, avec des ordres de grandeur sur les caractéristiques des moteurs utilisés.***

Tableau II

Type de transport	Véhicules	Charge utile	Types des moteurs utilisés	Puissance unitaire	Observations
Route	voitures légères autobus, autocars poids lourds	4 à 5 personnes 1 000 kg 60 personnes ⩽ 35 tonnes	moteurs à essence Diesels légers Diesels moyens Diesel de forte puiss. turbine à gaz	15 à 45 kW 30 à 45 kW 45 à 110 kW 150 à 300 kW > 250 kW	La turbine commence à concurrencer le Diesel pour les fortes puissances
Fer	motrices électriques motrices autonomes	1 000 personnes 1 000 à 5 000 tonnes	moteur électrique Diesel turbine à gaz	3 000 kW 1 500 à 2 500 kW 4 000 kW	La charge dépend considérablement des caractéristiques du réseau (pentes) et du nombre de motrices attelées
Eau	paquebots cargos vrac tankers	quelques centaines à 2/3 000 pers. 5 000 t à 500 000 t	Diesels marins turbines à vapeur	2 à 5 000 kW 3 à 30 000 kW	La machine à vapeur vapeur à piston subsiste encore pour des cas particuliers
Air	avions fusées	500 personnes (1) 50 t de fret masse satellite 130 t (2)	turboréacteur moteur fusée	poussée 2 t poussée/masse de l'ordre de 1,25	Jumbo Jet (1) pds. en charge de 352 t Fusée Saturne (2) pds. au départ de 2 740 t



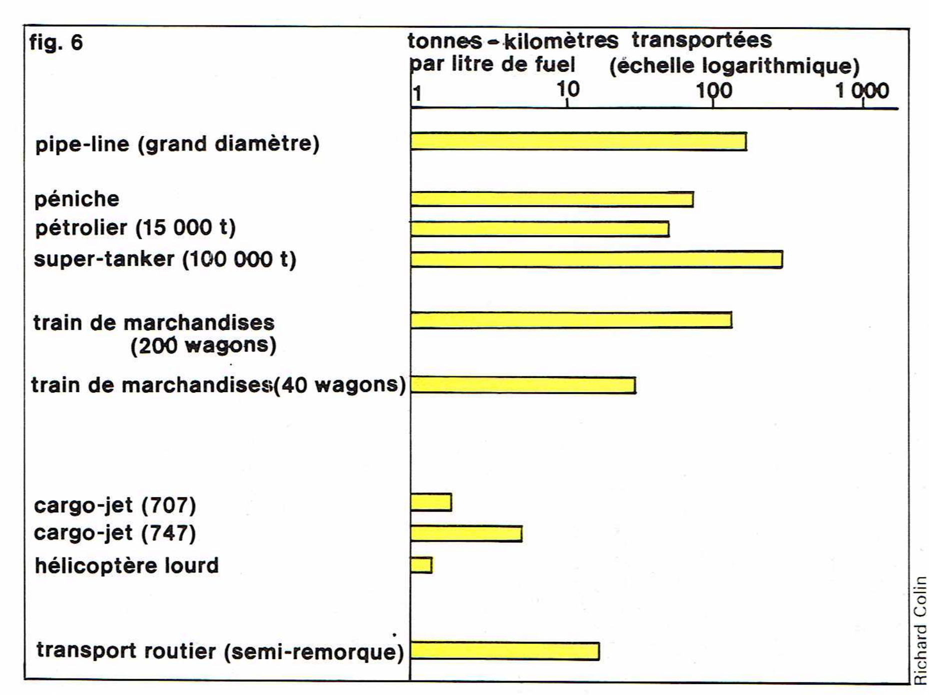
▲ *Figure 5 : comparaison des différents moyens de transport des personnes exprimée en nombre de passagers-kilomètres transportés avec un litre de combustible. (Ce tableau montre que la mort du transatlantique, comme moyen de transport, était inéluctable).*

▼ *Figure 6 : comparaison des différents moyens de transport des marchandises exprimée en tonnes-kilomètres transportées avec un litre de combustible.*

ou un navire. On sait que certains constructeurs automobiles sont en train de l'introduire à grande échelle sur les voitures particulières.

On constatera également que la plupart des moteurs utilisés fonctionnent avec des combustibles provenant des sources d'énergie fossiles : essence, gas-oil, kérosène, etc., ce qui explique que le secteur des transports utilise dans la plupart des pays plus de 90 % de son énergie sous forme d'énergie fossile. Seuls pour l'instant les transports par fer ont adopté sur une grande échelle la propulsion électrique.

A la suite de ces deux observations : moteurs non spécifiques à un moyen de transport et importance des moteurs utilisant des combustibles d'origine fossile, nous étudierons essentiellement les convertisseurs thermomécaniques. Notons à ce sujet que les convertisseurs en question effectuent en fait une double conversion. L'énergie chimique du combustible est dans un premier temps convertie en énergie thermique, et celle-ci est ensuite convertie en énergie mécanique disponible alors pour la propulsion. Cette distinction est absolument nécessaire pour l'ingénieur qui a en charge l'étude du moteur. L'utilisateur d'une voiture constate simplement que l'essence dont il a rempli son réservoir lui permet de faire rouler sa voiture.



Notons également que cette distinction entre énergie chimique et énergie mécanique n'est pas toujours nécessaire. Dans un moteur atomique de fusée, les particules en mouvement émises par le moteur assurent la propulsion par réaction. Il est préférable alors de retourner à la notion d'énergie cinétique du physicien qui confond alors énergie thermique et mécanique.

Économie des transports

Du fait de leurs multiples possibilités, les différents moyens de transport entrent en concurrence sur de nombreux marchés. Pour l'utilisateur, qu'il s'agisse de transport de personnes ou de marchandises, l'élément prépondérant du choix est évidemment le coût global de l'opération. Le coût réel d'un transport peut être difficile à évaluer si on veut prendre en compte d'autres éléments comme le temps de transport, le risque de retard ou la commodité.

On sera enclin à n'attacher que peu d'importance au coût de transport d'une marchandise si ce coût ne représente qu'une faible part de son prix de revient final ; ce coût sera en revanche très important pour des produits à faible valeur ajoutée comme certains matériaux bruts. Pour réduire le prix spécifique de transport, on cherchera alors à minimiser la part des coûts correspondants, ce qui conduit au gigantisme des superpétroliers, par exemple.

Jusqu'à présent, un des paramètres importants du coût était la dépense en capital correspondant à la part prise par les immobilisations dans le prix de revient du transport. L'augmentation du prix de l'énergie a modifié cet aspect du problème.

On trouvera sur la *figure* 5 une comparaison des différents moyens de transport des personnes, exprimée en nombre de passagers-kilomètres transportés avec un litre de combustible ; on voit l'avantage des transports par fer ou par bus sur les transports par voiture individuelle et avion. La *figure* 6 établit la même comparaison par des tonnes-kilomètres transportées avec un litre de combustible. L'économie de transport par superpétroliers, pipe-lines, transport par fer et à la rigueur par gros camions apparaît à l'évidence.

Ces comparaisons nous montrent que nos systèmes de transport se sont développés, surtout en ce qui concerne les transports de personnes, sans une forte préoccupation des économies de combustible. Il ne faut pas attendre de l'augmentation brutale du coût de l'énergie des modifications structurelles importantes de nos moyens de transport dans un proche avenir. Ce n'est pas en quelques années qu'il sera possible de modifier les moteurs des 150 millions de voitures qui roulent de par le monde. A long terme, il en sera différemment. Nos moyens de transport de la fin du siècle seront très différents de ceux que nous utilisons aujourd'hui. Parmi les facteurs d'évolution, il faudra compter avec les nécessaires économies d'énergie. On peut donc prédire une électrification d'une fraction du parc automobile, une amélioration du rendement des moteurs, le développement des transports en commun, la création de nouvelles voies fluviales et la construction de pipe-lines dans les prochaines décennies. Les technologies nouvelles ne feront sans doute leur apparition qu'à la fin du siècle. D'ici là, la tendance générale à l'accroissement de la demande de transports l'emportera de beaucoup sur les économies d'énergie réalisées, même si le coût de cette dernière continue à croître.

Priorité de la conversion électromécanique : la « civilisation de l'électricité »

Nous ne sommes plus en 1900 pour chanter les vertus de la fée « Électricité ». Nous savons tous aujourd'hui que l'électricité a joué un rôle capital dans le développement de nos sociétés industrielles et qu'en particulier, sans elle, notre vie quotidienne ne serait pas ce qu'elle est. Fluide invisible, l'électricité est partout présente pour répondre instantanément à nos besoins les plus divers.

Serait également inutile ici une histoire du développement de l'électricité. Il en existe de nombreuses, fort bien faites de surcroît. On y voit comment vingt-cinq siècles



M. Durazzo - Magnum

◀ *A la fin du siècle, nos moyens de transport seront très différents de ceux que nous utilisons aujourd'hui. Parmi les facteurs d'évolution : l'électrification d'une fraction du parc automobile, dont on voit ici un prototype (vue des batteries d'alimentation).*

ont été nécessaires pour que l'électricité, dont les manifestations naturelles, fracassantes et inexplicables, terrorisaient les Anciens, devienne sous nos mains et à notre volonté un fluide inoffensif et familier.

Le succès de l'électricité est dû à ses possibilités très grandes de conversion. Elle devient à la demande lumière, chaleur, énergie mécanique ou énergie chimique. Ses emplois sont donc très diversifiés : éclairage, chauffage, moteurs, électrolyse, accumulateurs, etc. Pour cette raison, il est intéressant de la distribuer largement, tant ses usages sont multiples.

Autre avantage : les conversions de l'électricité se font toujours avec un excellent rendement, ce qui signifie que les pertes sont très faibles ou nulles. Un moteur électrique nous restitue en énergie mécanique 90 % de l'énergie électrique qu'il a consommée. Le rendement est de 100 % pour une résistance de chauffage. Pour cette raison, on a toujours considéré l'électricité comme une énergie « noble », par opposition à d'autres formes d'énergie qui ne peuvent être converties sans pertes. Son prix, d'autre part, plus élevé que celui des combustibles fossiles quand ces derniers étaient bon marché ajoutait encore à cette image aristocratique attachée à cette forme d'énergie.

L'électricité régnait donc en maître sur des marchés spécifiques où sa place ne pouvait guère être contestée.

Cette situation aurait pu se maintenir encore longtemps si la crise de l'énergie n'avait bouleversé les données du problème. Le renchérissement brutal du pétrole qui a, en 1973, multiplié son prix par un facteur 4 en moins d'un an a permis le démarrage dans le monde entier de programmes importants de construction de centrales nucléaires. En 1976, en France, il coûte deux fois moins cher environ de fabriquer de l'électricité nucléaire que de l'électricité à partir du fuel.

Le recours au nucléaire ne sera peut-être pas dans les décennies à venir aussi important qu'on pouvait l'imaginer il y a quelques années. Le ralentissement de la croissance, la contestation nucléaire, la nécessité d'une diversification des sources d'énergie sont autant de raisons pour freiner le développement du nucléaire. Cependant nos économies s'appuieront de façon significative sur l'énergie nucléaire, pour la simple raison qu'on n'a pas trouvé pour les 20 à 30 ans qui viennent d'autre possibilité. L'énergie nucléaire ne pouvant être totalement récupérée que sous forme électrique, nous allons inéluctablement vers une société dont le fonctionnement et le développement reposeront de plus en plus sur l'électricité.

Ceci donne bien évidemment une grande importance à l'électricité, à ses différents procédés de conversion et en particulier à la conversion électromécanique, c'est-à-dire au passage d'énergie mécanique en énergie électrique et inversement. En effet, l'électricité est généralement obtenue à partir d'énergie mécanique. Que ce soit à l'aide d'une turbine à vapeur classique ou nucléaire, d'une turbine hydraulique, d'une turbine à gaz ou d'un Diesel, l'électricité est toujours produite à grande échelle par les alternateurs entraînés mécaniquement par des machines motrices. Ensuite, nos sociétés ont soif d'énergie mécanique pour leurs industries, leurs transports ou leurs services : l'électricité a pour ce type de conversion de nombreux atouts. Dans le paragraphe consacré à l'électromécanique, nous examinerons donc les différentes machines capables d'assurer ce type de conversion.

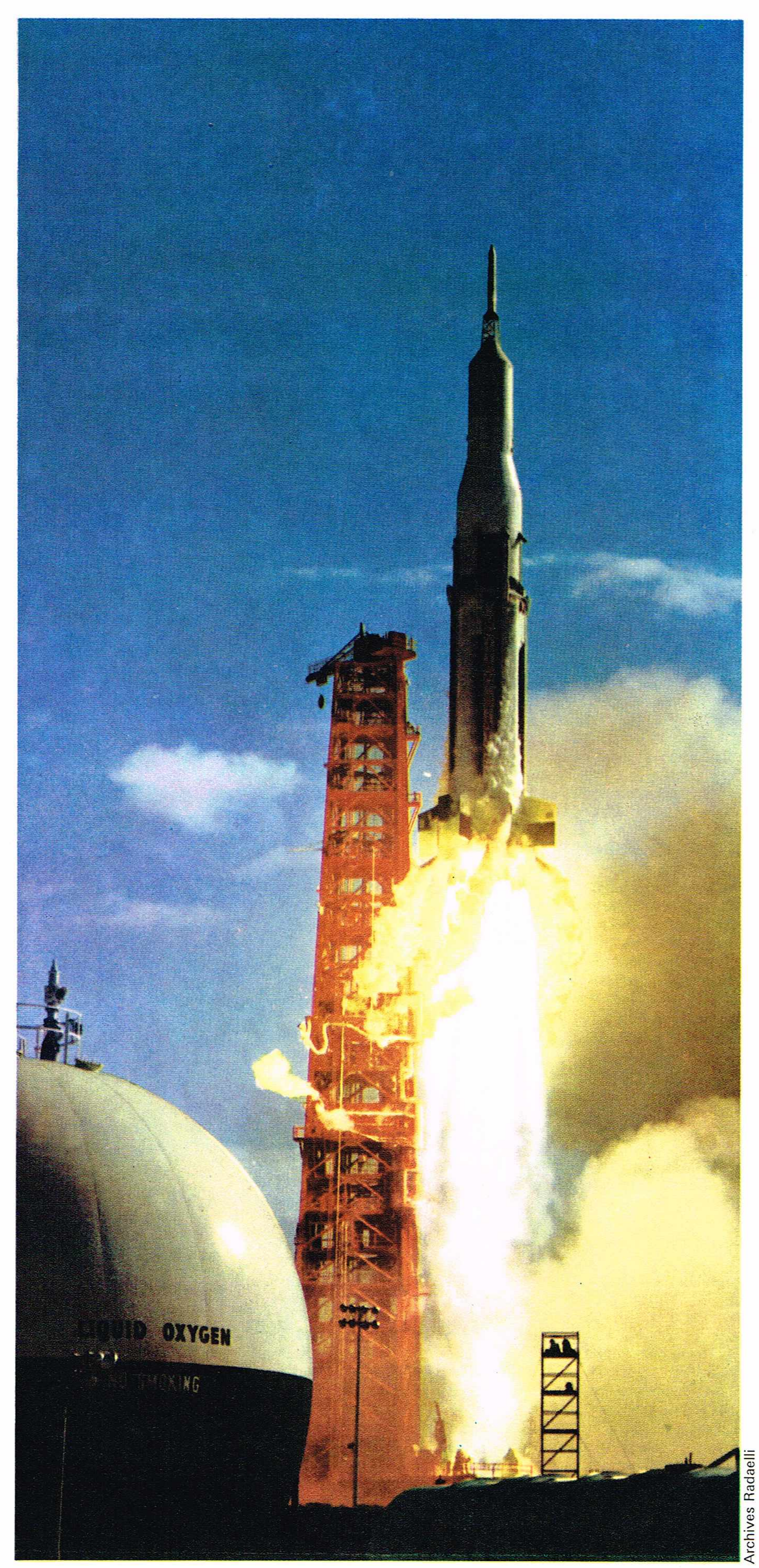
La « civilisation de l'hydrogène »

On a vu au paragraphe précédent que l'électricité nucléaire allait se substituer progressivement aux combustibles fossiles dans la mesure où cette forme d'énergie deviendrait progressivement plus économique.

Une pénétration massive de l'électricité en usage direct sur le marché énergétique va se heurter à diverses difficultés. Tout d'abord, l'électricité ne se stocke pas et son transport est onéreux par les investissements à consentir et les pertes en service. D'autre part, l'utilisation directe de réacteurs nucléaires ne paraît pas possible dans les technologies connues aujourd'hui. Dans le domaine des transports par exemple, on ne peut pas envisager l'emploi de réacteurs comme source de puissance pour de multiples raisons : masse critique du réacteur, blindages lourds et encombrants, considération de sûreté, etc.

Certains spécialistes se demandent donc jusqu'à quel point la stratégie actuelle pour une politique énergétique fondée sur l'emploi prédominant de l'électricité est vraiment la meilleure. Quelles solutions peut-on donner à ce problème ? Celle qui vient à l'esprit est de revenir à l'énergie chimique dont un des avantages est le stockage facile, en synthétisant des combustibles à l'aide de l'énergie nucléaire. Les options possibles sont l'accumulateur, la pile à combustible ou le moteur thermique.

De ces possibilités, on écarte aujourd'hui l'accumulateur dont le développement piétine. De nouvelles solutions ont bien été imaginées, mais leur mise en œuvre qui exige des matériaux coûteux et des produits chimiques dangereux ne promet pas à ce type de stockage de l'électricité sous forme chimique une très grande extension. Les accumulateurs garderont un rôle spécifique dans l'utilisation de l'énergie électrique et on peut penser que, même si dans une période intermédiaire il est fait appel à eux (véhicule électrique avec batteries par exemple), cette solution ne peut résoudre le problème du stockage temporaire de l'énergie sur une grande échelle.



Archives Radaelli

Si on s'intéresse à présent aux combustibles eux-mêmes, la chimie nous indique qu'il faut faire appel aux éléments légers si on veut disposer d'un rapport de quantité d'énergie par unité de masse élevé, d'où l'intérêt porté à l'hydrogène.

On sait que l'hydrogène est le premier élément de la classification de Mendeleïev. C'est l'atome le plus simple qui est le plus répandu dans l'Univers. Sur terre, il est présent en quantité considérable comme élément constitutif de l'eau. C'est un gaz beaucoup plus léger que l'air dans un rapport 14. Pour cette raison, il a été utilisé pour gonfler des ballons mais tout le monde sait qu'il a été écarté de cet usage en raison de son inflammabilité qui en fait un gaz au maniement dangereux.

L'hydrogène se présente cependant comme un combustible idéal. En plus de son pouvoir calorifique très élevé par unité de poids, l'hydrogène a l'avantage considérable de ne donner que de l'eau comme produit de combustion. Comme on recherche pour l'avenir des combustibles fonctionnant dans des cycles fermés, on voit tout l'avantage de l'hydrogène : issu de l'eau, l'hydrogène brûlerait en ne libérant comme effluent que de la vapeur d'eau.

On imagine donc aujourd'hui toute une économie énergétique ayant comme vecteur principal l'hydrogène liquide. Extrait de l'eau par utilisation de l'électricité nucléaire, puis liquifié, l'hydrogène sous forme liquide serait distribué et stocké comme un combustible classique. Sa combustion avec l'oxygène dans des convertisseurs appropriés donnerait comme produit résiduel de l'eau qui retournerait aux égouts comme les eaux pluviales ou résiduaires. Il ne semble pas exister d'autres combustibles capables de brûler pour restituer leur énergie chimique sans décharger dans l'environnement des effluents nocifs. (Les accumulateurs présentent cet avantage de stocker de l'énergie chimique et de la restituer sans dégager d'effluent. Mais on a vu les limitations de ce type de convertisseurs.) L'ammoniac, qui est constitué comme on le sait de trois atomes d'hydrogène pour un atome d'azote (NH_3) serait lui aussi un combustible intéressant, mais il a l'inconvénient sur l'hydrogène de posséder une partie inerte d'azote qui donne après combustion des oxydes d'azote dont la présence n'est pas souhaitable.

L'idée d'utiliser l'hydrogène comme combustible n'est pas nouvelle. Malheureusement, son développement comme combustible synthétique de remplacement a été jusqu'à très récemment freiné par le coût très bas des hydrocarbures. On ne l'a donc utilisé que dans des cas très spécifiques où ses qualités le rendaient indispensable. Il est surtout employé aujourd'hui comme combustible dans des moteurs de fusées. On l'utilise également en grandes quantités comme matière première dans un grand nombre d'opérations chimiques. Son utilisation généralisée poserait bien évidemment des problèmes de production, de stockage, de transport et d'utilisation dans des convertisseurs dont la plupart restent à imaginer, mais on peut déjà avancer que les avantages de l'hydrogène le font considérer par de nombreux experts comme le combustible de remplacement des combustibles fossiles au début du siècle prochain.

Production d'énergie calorifique

Généralités

La production de chaleur utilise les principes et les lois de la thermique et de la thermodynamique qui ont déjà été décrits. Nous nous contenterons en début de ce paragraphe de rappeler quelques notions fondamentales sur :

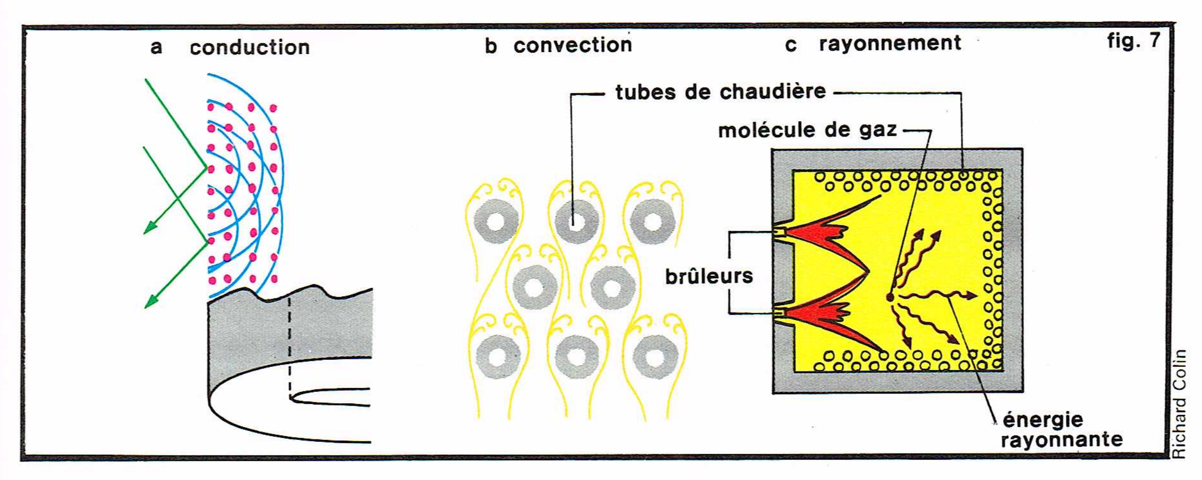
— la transmission de la chaleur,
— les caractéristiques de la vapeur d'eau,
— les cycles thermodynamiques.

Transmission de la chaleur

Il existe 3 modes de transmission de la chaleur (*fig.* 7) :

— la conduction,
— la convection,
— le rayonnement.

Ces trois modes coexistent en général dans tout échange de chaleur.



◀ *Figure 7 : trois modes de transmission de la chaleur.*
a) Conduction : *la chaleur se transmet à l'intérieur d'un corps par le mouvement des atomes et des molécules; la figure montre comment se propage, à l'intérieur d'un tube de chaudière, l'effet du choc de deux molécules de gaz.*
b) Convection : *après avoir échangé (perte ou gain) de l'énergie au contact d'un tube, les parties chaudes et froides du fluide se mélangent dans l'écoulement. Ce mélange, au cours duquel se font les échanges d'énergie, est le phénomène de convection.*
c) Rayonnement : *la chaleur est transmise à partir des atomes ou des molécules en interaction, dans toutes les directions, sous forme d'ondes électromagnétiques. Exemple : rayonnement dans un foyer de chaudière.*

On appelle *flux de chaleur* ou flux d'énergie calorifique la quantité de chaleur Q reçue ou émise par unité de temps :

$$\Phi = \frac{Q}{t}$$

Dans le système légal, le flux de chaleur s'exprime en joules par seconde (J/s), c'est-à-dire en watts (W). Les thermiciens qui préfèrent utiliser pour exprimer l'énergie calorifique la calorie (cal) ou la thermie (1 th = 10^6 cal) emploient comme unité de flux la millithermie par heure et par m² (1 mth/h/m² = 15,07 × 10^6 W/m²).

Conduction

Elle se produit à l'intérieur d'un corps ou au contact de deux corps. Elle est régie par la loi de Fourier :

$$Q = \lambda \frac{S}{e} (t_1 - t_2)$$

La quantité de chaleur Q transmise par unité de temps au travers d'une paroi d'épaisseur e est proportionnelle à :
— la surface d'échange S
— l'écart de température $t_1 - t_2$
— la nature du matériau constituant la paroi que l'on caractérise par un coefficient λ de conduction thermique. Ce coefficient s'exprime en mth/h · m · °C. Plus il est élevé, plus le matériau est bon conducteur de la chaleur.

Convection

La convection est la transmission de chaleur entre un fluide en mouvement et un solide. Ce mode de transmission qui implique un mouvement au sein même du fluide ne peut s'appliquer en conséquence qu'aux liquides et aux gaz.

Il existe différents modes de convection.

Convection naturelle : les mouvements du fluide sont déterminés uniquement par les variations de volume dues à l'échauffement ou au refroidissement des parties de ce fluide.

Convection forcée : le fluide est mis en mouvement par des pompes ou des ventilateurs.

On peut exprimer la loi de l'échange de chaleur par une expression similaire à celle qui régit la conduction :

$$Q = \alpha \cdot \frac{S}{e} (t_1 - t_2)$$

α est un coefficient de convection exprimé également en mth/h · m · °C mais sa détermination est très complexe, car de nombreux facteurs interviennent dans le phénomène de convection. Il est nécessaire de faire appel à la mécanique des fluides. Pour le calcul des installations, on utilise souvent des formules empiriques ou des résultats expérimentaux de constructions précédentes.

Rayonnement

Tout corps émet des radiations calorifiques. Un autre corps placé en regard du premier captera ces radiations et s'échauffera s'il est à une température inférieure au premier. Il y a alors transfert de chaleur du corps le plus chaud vers le corps le plus froid. Les lois du rayonnement sont assez différentes des lois relatives à la conduction et à la convection. Le milieu dans lequel se fait le rayonnement n'intervient pas comme agent transmetteur comme c'est le cas dans la convection.

L'émission de rayonnement calorifique est régie pour les corps noirs (corps parfaitement absorbants) par la loi de Stefan :

$$\Phi = \sigma \cdot ST^4$$

Φ est l'énergie rayonnée, S la surface du corps qui rayonne, T la température absolue du corps (en °Kelvin) et σ le coefficient de rayonnement.

L'absorption dépend de la surface offerte aux radiations, de la distance entre la source et le corps absorbant, et de la nature de la surface de réception. On sait qu'une surface noire mate absorbe la quasi-totalité du rayonnement. Une surface blanche en absorbe très peu. Les surfaces que l'on rencontre dans les foyers industriels sont des corps *gris* dont le facteur d'absorption est compris entre 0,8 et 0,95 (corps noir : 1).

On appelle *vapeur saturante* une vapeur en équilibre avec son liquide. Dans les conditions de saturation, il existe une relation entre la pression et la température de la vapeur. On connaît pour la vapeur d'eau la formulation approchée de Duperray :

$$p = \frac{(t)^4}{100}$$

p en bars, t en °C valable entre 100 et 200 °C.

La quantité de chaleur à fournir à 1 kg d'eau aux conditions de la saturation pour le transformer en vapeur dans les mêmes conditions est appelée *chaleur latente de vaporisation.*

Caractéristiques de la vapeur d'eau

On appelle *enthalpie* de la vapeur saturée à la température de saturation t °C la quantité de chaleur qu'il est nécessaire de fournir à 1 kg d'eau pris à la température de 0 °C pour l'amener à l'état de vapeur à la température t et à la pression de saturation correspondant à cette température. L'enthalpie est donc une chaleur totale repérée par rapport à un niveau thermique de 0 °C et peut donc être déterminée pour du liquide ou de la vapeur surchauffée. On trouve les valeurs de l'enthalpie dans des tables ou sur un diagramme, appelé diagramme de Mollier, très utilisé par les thermiciens (*tab.* III et *fig.* 8).

On appelle *vapeur humide* une vapeur qui contient en son sein des gouttelettes de liquide. On appelle *titre* d'une vapeur humide le rapport entre la masse de vapeur et la masse totale de fluide. Ce titre est souvent désigné par la lettre x. La vapeur sèche a comme titre $x = 1$. Un kilogramme de vapeur humide contenant 0,1 kg d'eau a un titre égal à 0,9.

Cycles thermodynamiques

Dans les anciennes installations de faible puissance, la vapeur d'eau était souvent rejetée après usage. Souvenons-nous de nos anciennes locomotives à vapeur. Dès que la puissance est importante, il devient indispensable de récupérer l'eau, et cette dernière décrit à l'intérieur de l'installation un *cycle fermé.*

L'eau, sous forme liquide ou vapeur, subit un certain nombre de transformations à la suite desquelles son état final se retrouve identique à son état initial.

On essaye dans toute la mesure du possible de se rapprocher de transformations *réversibles*. On entend par

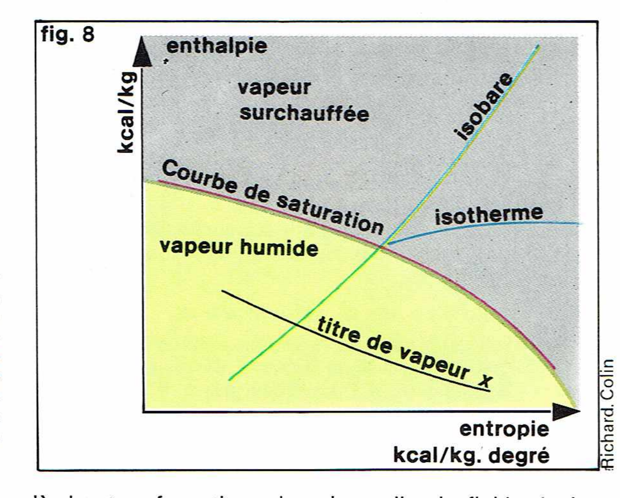
◀ *Page ci-contre : freiné jusqu'à présent par le coût très bas des hydrocarbures, le développement de l'hydrogène comme combustible s'est limité à des utilisations très spécifiques et notamment à l'alimentation des moteurs de fusées. Ici, le lancement de la fusée* Saturne I, *le 16 février 1965 à cap Kennedy.*

▶ *Tableau III : enthalpie (en kJ/kg) et volume massique (en m³/kg) de la vapeur saturée et de la vapeur surchauffée.*

Tableau III

Enthalpie (en kJ/kg) et volume massique (en m³/kg) de la vapeur saturée et de la vapeur surchauffée

Pression absolue en bars	Vapeur saturée					Vapeur surchauffée											
						250 °C		300 °C		350 °C		400 °C		500 °C		600 °C	
	Température en °C	Enthalpie	Chaleur latente	Enthalpie du liquide	Volume massique	Enthalpie	Volume massique	Enthalpie	Volume massique	Enthalpie	Volume massique	Enthalpie	Volume massique	Enthalpie	Volume massique	Enthalpie	Volume massique
0,02	17	2 532	2 459	73	67,02	2 976	120,7	3 076	132,2	3 176	143,8	3 278	155,3	3 488	178,4	3 704	201,5
0,10	45	2 583	2 392	191	14,68	2 976	24,13	3 075	26,44	3 176	28,75	3 278	31,06	3 488	35,68	3 704	40,29
1	99	2 673	2 256	417	1,694	2 973	2,406	3 073	2,638	3 174	2,870	3 277	3,102	3 487	3,565	3 703	4,027
5	151	2 746	2 107	639	0,374	2 960	0,474	3 063	0,522	3 166	0,569	3 270	0,617	3 482	0,710	3 700	0,803
10	179	2 777	2 015	762	0,194	2 943	0,232	3 050	0,257	3 155	0,282	3 262	0,306	3 477	0,353	3 696	0,400
15	198	2 792	1 948	844	0,131	2 925	0,152	3 037	0,169	3 146	0,186	3 254	0,202	3 471	0,235	3 692	0,266
20	212	2 800	1 892	908	0,099	2 905	0,111	3 023	0,125	3 135	0,138	3 246	0,151	3 466	0,175	3 688	0,199
30	233	2 805	1 797	1 007	0,066	2 859	0,070	2 994	0,081	3 114	0,090	3 229	0,099	3 455	0,116	3 680	0,132
40	250	2 802	1 715	1 086	0,049	—	—	2 962	0,058	3 092	0,066	3 212	0,073	3 443	0,086	3 672	0,098
50	263	2 794	1 640	1 153	0,039	—	—	2 926	0,045	3 069	0,051	3 195	0,057	3 432	0,068	3 664	0,078
60	275	2 783	1 570	1 213	0,032	—	—	2 885	0,036	3 044	0,042	3 177	0,047	3 421	0,056	3 656	0,065
85	299	2 749	1 409	1 339	0,021	—	—	—	—	2 972	0,027	3 129	0,032	3 392	0,039	3 636	0,045
110	318	2 708	1 258	1 449	0,016	—	—	—	—	2 884	0,019	3 076	0,023	3 362	0,029	3 616	0,034
135	333	2 651	1 101	1 549	0,012	—	—	—	—	2 776	0,014	3 015	0,018	3 332	0,023	3 596	0,027
160	347	2 581	929	1 648	0,009	—	—	—	—	2 614	0,009	2 946	0,014	3 300	0,019	3 575	0,023
185	359	2 491	736	1 754	0,007	—	—	—	—	—	—	2 867	0,011	3 266	0,016	3 554	0,019
220	373	2 218	208	2 009	0,003	—	—	—	—	—	—	2 737	0,008	3 216	0,013	3 524	0,016



▶ *Figure 8 : diagramme de Mollier. Ce diagramme fait apparaître deux zones séparées par la courbe de saturation : zone de vapeur surchauffée à la partie supérieure ; zone de vapeur humide à la partie inférieure.*

là des transformations dans lesquelles le fluide évolue sans frottements et dans des conditions thermiques telles que les températures du fluide et des diverses sources de chaleur au moment des échanges calorifiques soient constamment égales. Les cycles réels présentent toujours des frottements et des différences de température aux points d'échange calorifique. Des exemples de cycles seront donnés ultérieurement dans le paragraphe concernant les moteurs thermiques.

Chaudières classiques

Une chaudière ou générateur de vapeur est un appareil destiné à transformer de l'eau en vapeur à une pression et à une température définies en fonction de l'utilisation à laquelle cette vapeur est destinée (*fig.* 9).

On désigne par chaudière classique les générateurs de vapeur pour lesquels l'apport calorifique provient de l'utilisation directe de la chaleur libérée par la combustion d'un combustible solide, liquide, ou gazeux.

L'apport calorifique peut provenir aussi d'un fluide en circulation chauffé ailleurs et qui cède ses calories à l'eau et à la vapeur. C'est le cas des générateurs de vapeur des chaudières nucléaires qui seront examinées dans le prochain paragraphe. Il ne sera pas traité ici des appareils, souvent de petite puissance, fonctionnant suivant ce principe : transformateur de vapeur, chaudières de récupération, etc.

Les chaudières classiques recouvrent un ensemble de matériels allant du petit générateur de 2 t/h de vapeur saturée sous quelques bars pour une teinturerie ou une coopérative laitière au générateur des centrales thermiques de l'E. D. F. de 700 MW produisant plus de 2 000 t/h à 542 °C de surchauffe.

Ces générateurs sont utilisés dans les domaines les plus divers :

— production de vapeur pour le chauffage ;

— production d'énergie et de vapeur pour les procédés dans les installations industrielles ;

— production d'énergie électrique dans les centrales thermiques ;

— propulsion des navires.

Il ne saurait être question de décrire tous les types de générateurs existants. Nous nous limiterons donc aux grands principes de construction en donnant des exemples pour les solutions les plus classiques.

Principales caractéristiques

Les performances d'une chaudière se définissent par les caractéristiques suivantes.

Débit de vapeur ou vaporisation, qui s'exprime en kg/h ou en t/h. Il se réfère en général à la marche normale en continu. Au-delà de ce régime de marche, un générateur peut supporter en général un fonctionnement en pointe de durée limitée.

Timbre, qui s'exprime en bars. C'est la pression de calcul de résistance mécanique des parties sous pression. Le règlement du Service des Mines définit la pression d'épreuve hydraulique en fonction du timbre (en général 1,5 le timbre).

Température de surchauffe exprimée en °C et la température de resurchauffe le cas échéant. Ces deux températures sont souvent voisines, car les faisceaux correspondants sont très voisins.

Rendement. Il est égal au rapport des calories utiles transmises à l'eau et à la vapeur sur les calories apportées par le combustible.

Une chaudière est généralement constituée de deux circuits.

Circuit air-gaz de combustion sur lequel on trouve successivement :
— les ventilateurs de soufflage,
— le réchauffeur d'air côté air de soufflage,
— le foyer avec ses brûleurs,
— l'économiseur et le réchauffeur d'air côté fumées,
— le traitement des fumées et la cheminée.

Circuit eau-vapeur sur lequel on trouve successivement :
— l'économiseur côté eau,
— les faisceaux vaporisateurs,
— les faisceaux surchauffeurs,
— les faisceaux resurchauffeurs.

Certaines parties nommées ci-dessus peuvent ne pas exister comme les faisceaux resurchauffeurs ou surchauffeurs. D'autres comme l'économiseur ou le réchauffeur d'air peuvent être indépendantes de la chaudière. Leur but est d'accroître le rendement. Ils n'existent que si une étude économique justifie leur installation.

Circuit air-gaz de combustion

Tous les matériels de ce circuit ont pour but de permettre la conversion de l'énergie chimique du combustible en énergie thermique. Le phénomène central est celui de la *combustion* qui prend place dans le foyer. Le combustible ou carburant est introduit dans ce foyer par des *brûleurs*, l'air qui apporte l'oxygène ou carburant est introduit par les *ventilateurs de soufflage*. En amont du foyer se trouve le circuit d'air de combustion et en aval le circuit des fumées qui se termine par la cheminée. Les appareils rencontrés dans certains cas sur le circuit des fumées tels que : économiseur, réchauffeur d'air et dépoussiéreur ne sont pas nécessaires à la combustion. Ils améliorent le rendement de la chaudière et la propreté des fumées rejetées à la cheminée.

Combustible et foyer

La combustion met en jeu des phénomènes physico-chimiques complexes qui ont été décrits par ailleurs. Nous nous limiterons ici à quelques aspects pratiques de cette question.

* *Combustibles*

Les combustibles les plus utilisés sont des combustibles liquides dérivés du pétrole, obtenus par mélange de produits résiduaires et de produits intermédiaires de raffinage. On les désigne sous les appellations de *mazout* ou de *fuel-oil*. Les autres combustibles utilisés sont soit des combustibles solides (charbon en particulier), soit des résidus industriels d'origine végétale, soit des sous-produits de fabrications industrielles tels que gaz de hauts fourneaux, gaz résiduaires de raffineries de pétrole, etc. Jusqu'en 1973, le bas prix du pétrole avait fait régresser les autres types de combustible, et en particulier le charbon. Ce mouvement semble s'être arrêté aujourd'hui.

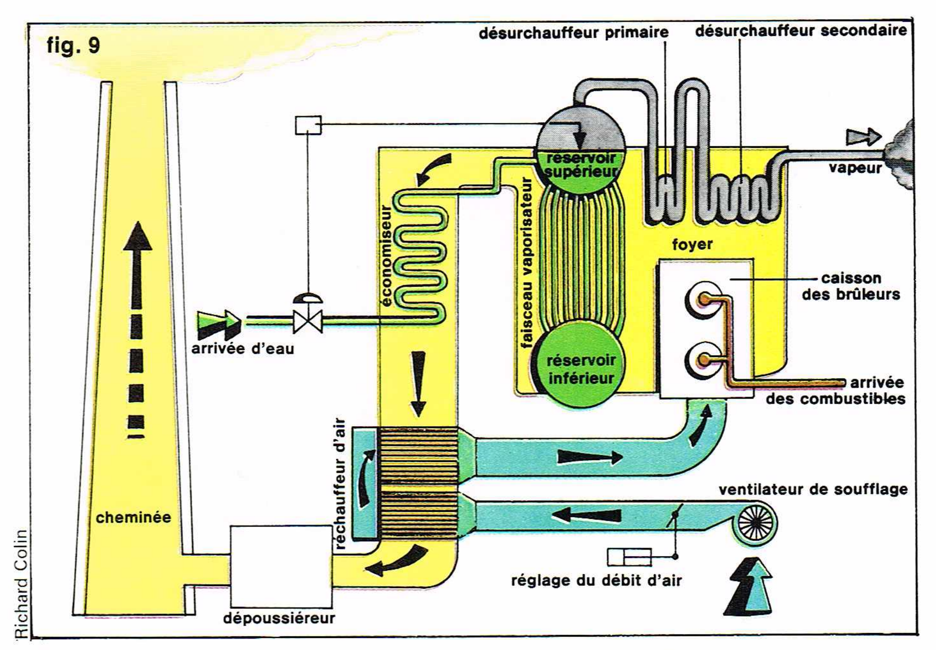
Les qualités des combustibles liquides sont très variables selon le dosage des mélanges et l'origine des bruts. La réglementation française définit quatre produits, dans l'ordre de viscosité croissante et de prix décroissants :
— le fuel-oil domestique, destiné aux petits usages industriels et au secteur résidentiel et tertiaire ;
— le fuel-oil léger, utilisé pour des installations plus puissantes et comme combustible de mise en route dans de grosses installations ;
— les fuel-oils lourds n° 1 et n° 2 très visqueux. Le fuel-oil n° 2 est le plus couramment utilisé sur les installations importantes (centrales thermiques en particulier).

A l'inverse des fuel-oils domestique et léger, les fuel-oils n° 1 et n° 2 doivent être réchauffés vers 40 °C pour pouvoir être pompés et vers 120 °C environ pour que leur viscosité soit convenable pour la pulvérisation dans les brûleurs.

* *Foyer*

Le foyer a généralement la forme d'un caisson sur les parois duquel sont disposés le ou les brûleurs. Ce caisson est dimensionné en fonction de la longueur des flammes et de la puissance calorifique dégagée de façon à assurer une totale combustion sans projection de combustible sur les parois et sans échauffement excessif de ces dernières.

Contrairement aux chaudières anciennes qui comportaient des briquetages de foyer très développés destinés à obtenir de hautes températures absolument nécessaires à la combustion du charbon, les chaudières modernes à fuel ont la plus grande partie de leurs parois constituée par des faisceaux de tubes, appelés écrans, dans lesquels se vaporise l'eau.



▲ ***Figure 9 : représentation schématique d'une chaudière classique de forte puissance.***

Un foyer se caractérise par son volume et la surface des tubes directement exposés à la flamme. Il est intéressant aussi de connaître la charge thermique en calories par m³ de foyer et par m² de surface directe.

Les températures atteintes dans le foyer se trouvent dans le domaine de 1 100 °C à 1 500 °C et la transmission de chaleur se fait principalement par rayonnement. Certaines chaudières, et c'est le cas des grandes centrales thermiques, n'utilisent pas le phénomène de convection pour la vaporisation de l'eau. Cette dernière s'effectue totalement dans les écrans de tube exposés au rayonnement. On les appelle pour ces raisons des *chaudières radiantes*.

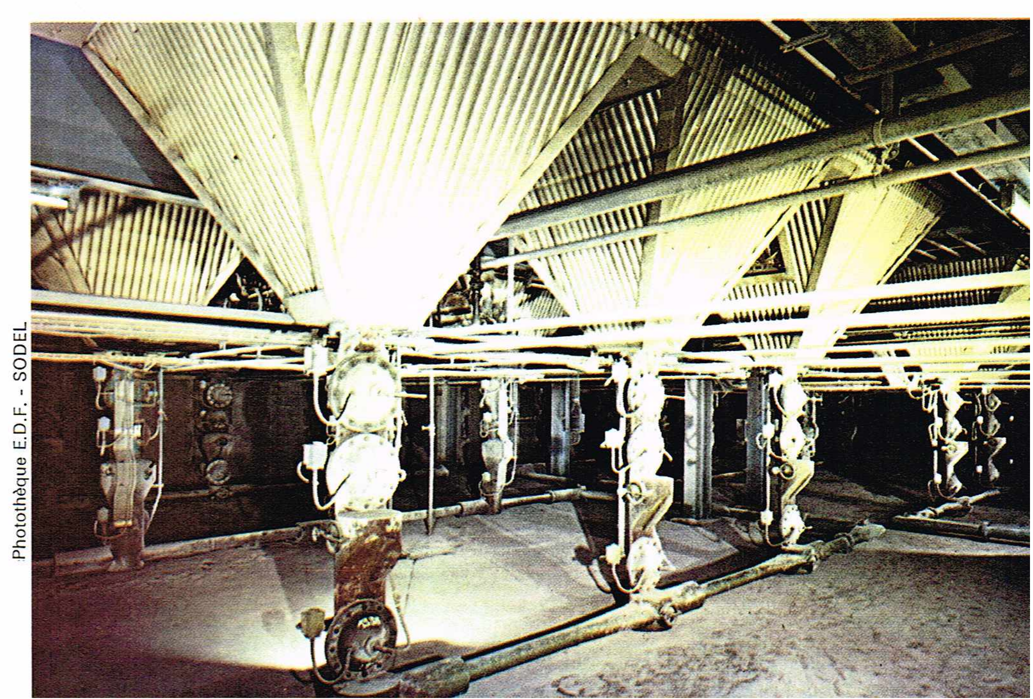
La partie inférieure de la chambre doit permettre l'extraction des cendres. Elle a souvent la forme d'une trémie appelée *cendrier*.

* *Brûleurs*

Les brûleurs ont pour but de démarrer et d'entretenir la combustion en assurant un mélange intime et homogène du combustible avec l'air de combustion.

Leur conception est fonction du type de combustible utilisé (solide, liquide ou gazeux) et de leur disposition sur le foyer. Nous examinerons seulement les brûleurs à fuel-oil qui sont les plus répandus.

Le rôle du brûleur est donc d'assurer la *pulvérisation* du combustible qui doit être introduit dans la chambre



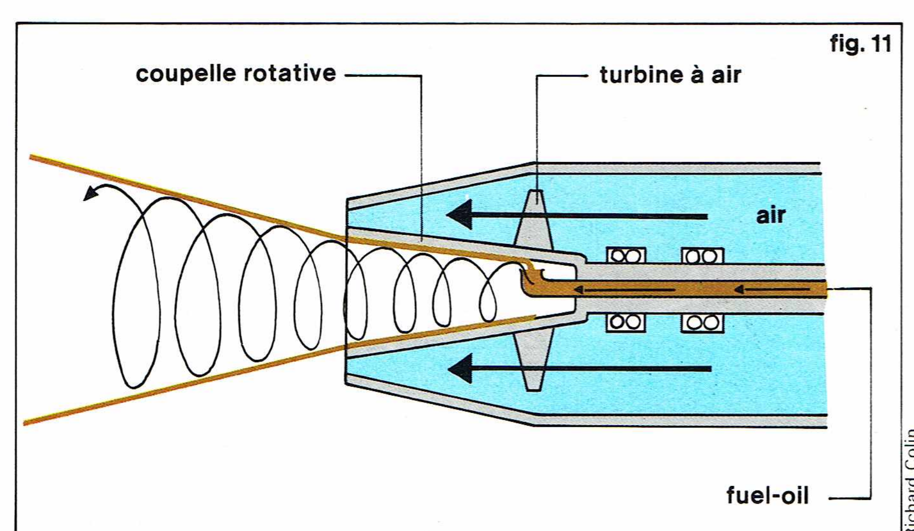
▼ ***Les trémies dépoussiéreuses de la centrale E. D. F. de Champagne-sur-Oise ; elles permettent l'extraction des cendres à la partie inférieure de la chambre de combustion.***

Photothèque E.D.F. - SODEL

▶ *Vue extérieure d'un brûleur de la centrale de Champagne-sur-Oise; le rôle du brûleur est de démarrer et d'entretenir la combustion.*

Photothèque E.D.F. - SODEL

▼ *Ci-dessous, figure 11 : principe du* brûleur à coupelle rotative. *En bas, figure 10; deux types de brûleurs à* pulvérisation mécanique : a) *à pulvérisation mécanique simple;* b) *à pulvérisation mécanique à retour.*



Richard Colin

fig. 10
a
orifice de la cuvette
trous tangentiels
tête de pulvérisation
tube du brûleur
combustible
fuel-oil
distributeur
cuvette ou capuchon
coupe du distributeur
trous tangentiels
b
orifice de décharge
capuchon
fuel-oil
tube intérieur
atomiseur

Richard Colin

de combustion en gouttelettes aussi fines que possible de façon à augmenter la surface de contact entre le fuel-oil et l'air.

La pulvérisation est obtenue par les trois procédés suivants :

— *Pulvérisation mécanique*

La pulvérisation est obtenue par refoulement du combustible liquide sous forte pression (au moins 7 bars) à travers l'orifice étroit du gicleur. Dans la tête du brûleur, le fuel-oil est mis en rotation par l'intermédiaire de canaux tangentiels dans une chambre de rotation; il est ainsi pulvérisé suivant un mouvement giratoire (*fig.* 10 a).

Ces brûleurs sont des appareils de précision qui exigent un entretien soigneux. Ils permettent d'obtenir de forts débits de pulvérisation avec une faible consommation d'énergie. Ils ont l'inconvénient de ne pas permettre le réglage du débit sur une plage importante. On règle donc la puissance par variation du nombre de brûleurs en service. En raison de ce manque de souplesse, on abandonne progressivement ce type de brûleurs au profit de procédés plus compatibles avec la conduite des installations modernes.

Pulvérisation mécanique à retour

Ces brûleurs fonctionnent suivant le principe de la pulvérisation mécanique mais ils comportent dans la chambre de détente un orifice de décharge relié à un circuit de retour du fuel-oil à l'aspiration des pompes de pulvérisation. En réglant l'ouverture de ce circuit de retour, on peut faire varier le débit d'injection dans la chambre de combustion dans un rapport de 1 à 6, tout en gardant la pleine pression pour la pulvérisation (*fig.* 10 b).

Ce procédé, qui apporte une solution acceptable au problème des variations de charge, présente les inconvénients de surdimensionner les groupes de pompage et de compliquer les circuits de combustible par les tuyauteries de retour.

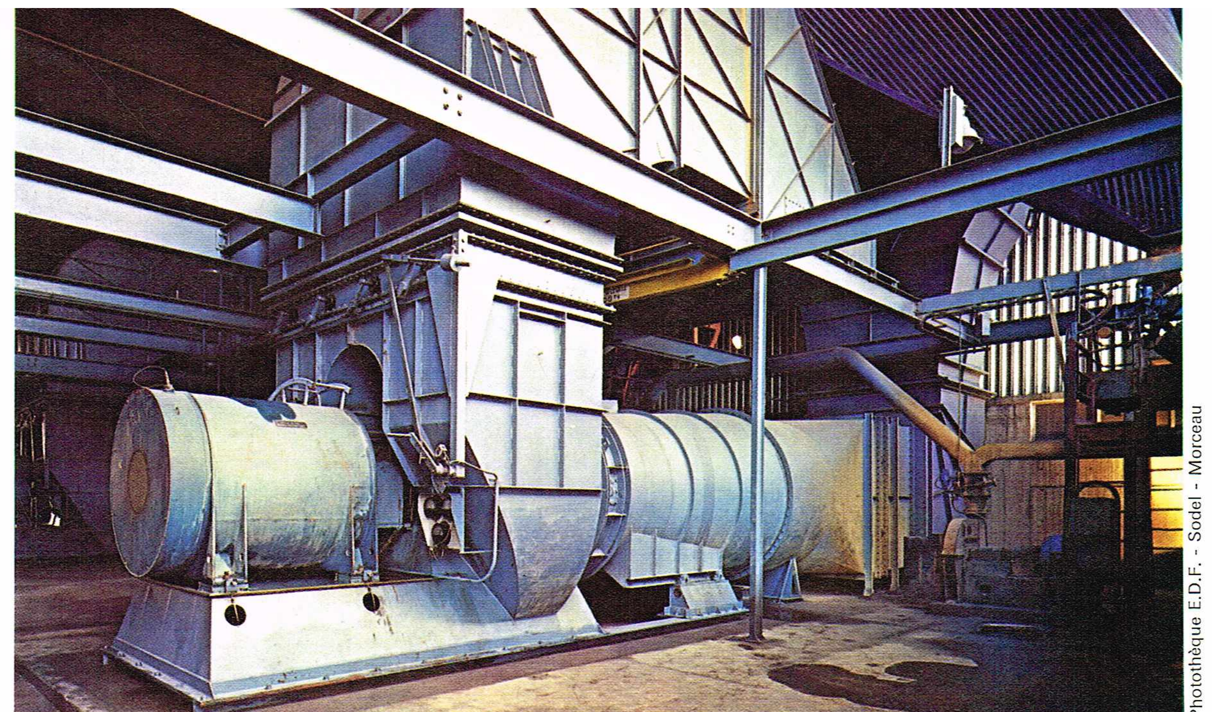
— *Pulvérisation assistée par fluide auxiliaire*

Un fluide auxiliaire (air comprimé ou vapeur) apporte l'énergie cinétique nécessaire à la pulvérisation. C'est le procédé le plus employé, aussi bien sur les chaudières terrestres que marines, car il autorise de larges variations de débit (pouvant aller de 1 à 15), ce qui permet l'automatisation de la chaudière. La consommation de fluide auxiliaire est un inconvénient de ce mode de pulvérisation.

— *Pulvérisation par coupelle rotative*

La pulvérisation est obtenue dans ce type de brûleur par action combinée de la force centrifuge et de l'air. Le fuel-oil est amené dans le fond d'une coupelle tronconique tournant à grande vitesse (3 000 à 7 000 t/mn). De là, il progresse sous l'action de la force centrifuge jusqu'à l'extrémité de la coupelle d'où il est projeté tangentiellement à grande vitesse et pulvérisé par l'air de soufflage (*fig.* 11).

Ce procédé, qui n'exige pas de porter le combustible à une pression élevée, permet des variations de charge importantes (rapport 1 à 25). Les brûleurs sont simples mais ils posent des problèmes d'entretien, car il faut périodiquement nettoyer les coupelles. Ce type de brûleur a surtout été développé en Allemagne.


Photothèque E.D.F. - Sodel - Morceau

◀ **Ventilateur de soufflage** ***de la centrale thermique de Champagne-sur-Oise (Val-d'Oise) [2 × 250 MW]; cet appareil refoule dans le foyer l'air nécessaire à la combustion au travers d'un réchauffeur.***

Soufflage et réchauffage de l'air

Les générateurs de vapeur de grande puissance sont souvent équipés de ventilateurs de soufflage et de ventilateurs de tirage. Les premiers refoulent l'air atmosphérique dans le foyer au travers d'un réchauffeur d'air; les seconds aspirent les gaz de combustion pour les refouler a la cheminée. La chambre de combustion est alors en légère dépression.

La circulation de l'air et des fumées peut n'être assurée que par des ventilateurs de soufflage. Dans ce cas, la chambre de combustion se trouve en pression : on dit qu'elle est *pressurisée*.

Certains générateurs de vapeur enfin utilisent des ventilateurs de recyclage des fumées pour permettre, comme on le verra plus loin, le réglage de la température de la vapeur surchauffée.

* *Ventilateurs*

Ces appareils transforment, grâce à une roue à aubes entraînée en rotation, l'énergie mécanique fournie par un moteur en un déplacement de gaz sous faible pression (inférieure à une hauteur de 2,5 m d'eau). Ils seront décrits plus en détail dans le chapitre *Transformation d'énergie*.

Les ventilateurs des gros générateurs sont généralement prévus par paires de façon à limiter les conséquences d'une indisponibilité : 2 pour le soufflage et 2 pour le tirage par exemple, ces 4 ventilateurs permettant le fonctionnement à pleine puissance. L'indisponibilité de l'un d'entre eux entraîne une limitation de la puissance à 70 % environ de sa valeur normale.

L'énergie consommée par les ventilateurs est importante. Sur les centrales thermiques produisant du courant, elle peut représenter 1,5 % de l'énergie produite par l'alternateur. A titre d'ordre de grandeur, les tranches E. D. F. de 700 MW sont équipées de 2 ventilateurs de soufflage de débit unitaire 124,5 m^3/s et de puissance unitaire 5 000 kW.

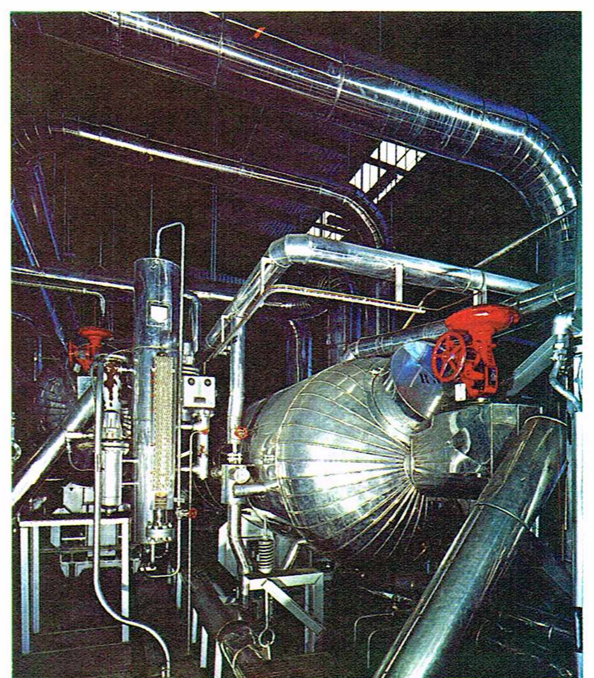
Le réglage du débit d'air se fait suivant divers procédés :
— variation continue ou discrète de la vitesse,
— registres (qui introduisent une perte de charge variable),
— pales orientables.

* *Réchauffeurs d'air*

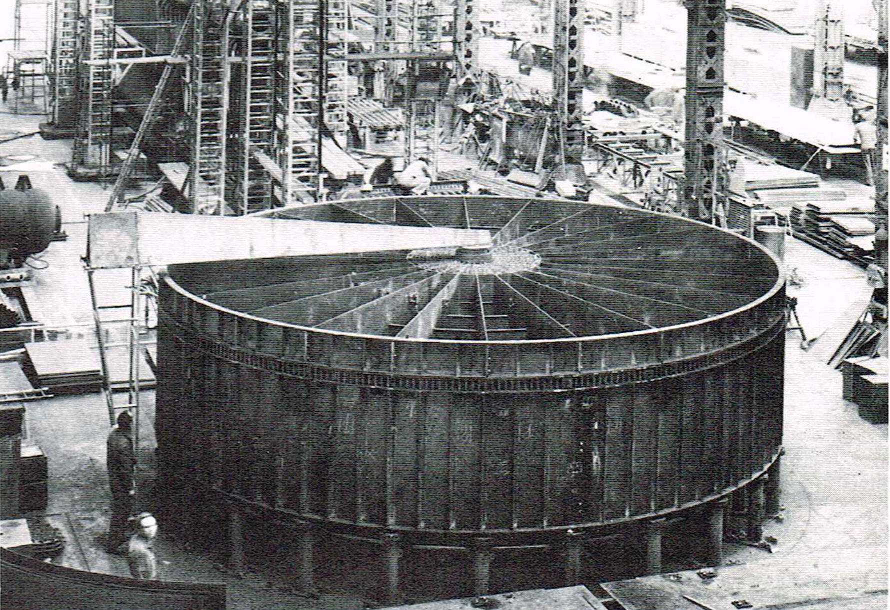
Le réchauffage de l'air de combustion permet de récupérer une partie de la chaleur contenue dans les fumées d'une part et favorise la combustion d'autre part.

La récupération de chaleur ne doit pas cependant être poussée trop loin si l'on veut éviter des risques graves de corrosion dus aux condensations acides dans les gaz de combustion. Il est donc prudent de ne pas descendre au-dessous d'une température correspondant à l'apparition de ces condensations. Cette température appelée température de rosée est comprise suivant les combustibles utilisés entre 100 et 150 °C.

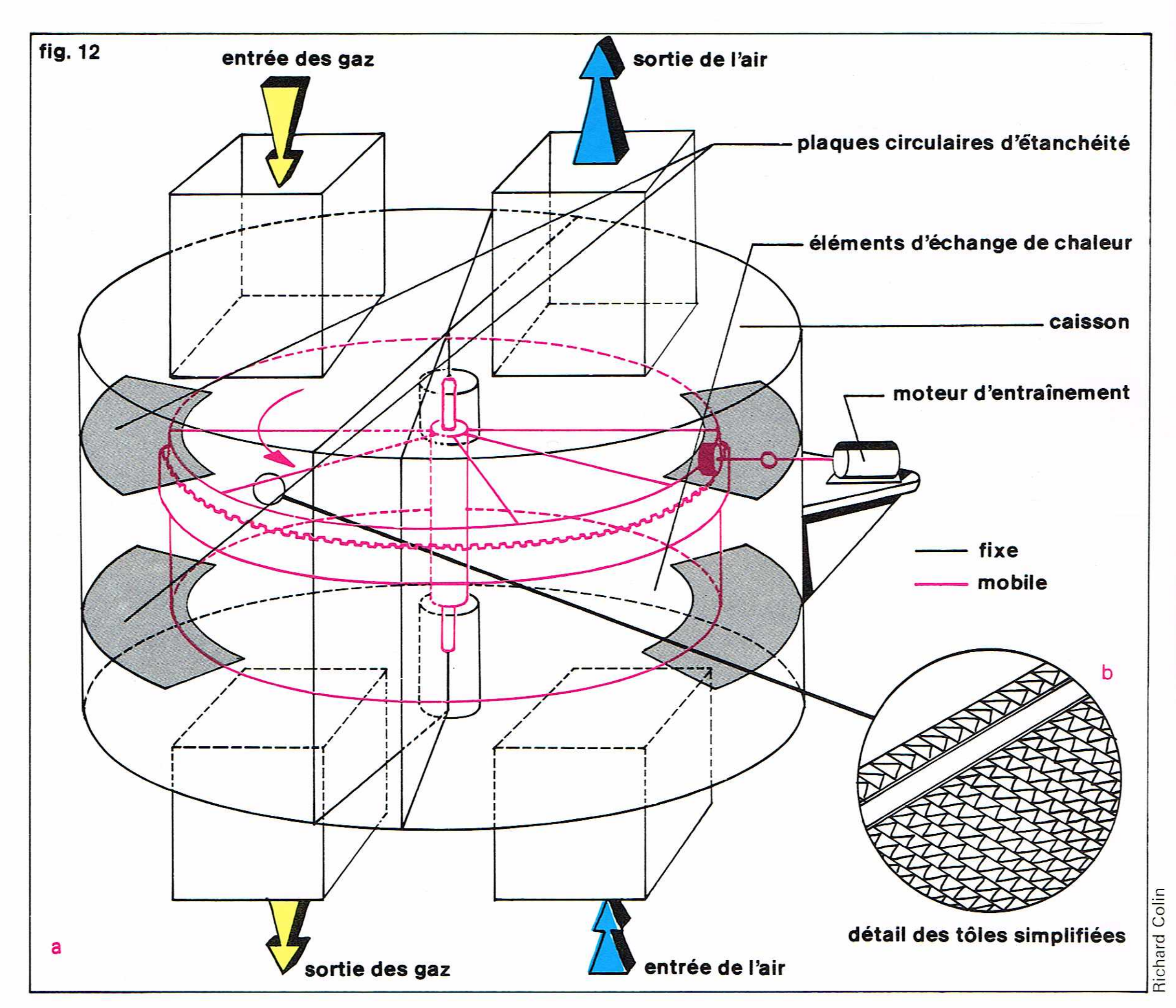
Pour atténuer ces risques de corrosion, on peut placer à l'amont du réchauffeur d'air sur les fumées un réchauffeur d'air à vapeur qui échauffe l'air de soufflage à plus de 80 °C pour éviter d'avoir des tubes trop froids dans


Photothèque E.D.F. - Sodel - Morceau

◀▼ ***Avant d'être introduit dans la chaudière, l'air de combustion, comme l'eau alimentaire, est réchauffé. Ci-dessous, en cours de montage, le rotor d'un réchauffeur d'air à régénération de type « Ljungström » qui utilise une partie de la chaleur contenue dans les fumées. Ci-contre, un réchauffeur d'eau haute pression, qui utilise la chaleur contenue dans la vapeur de soutirage de la turbine.***


Fives - Cail Babcock

▶ *Figure 12 : principe du réchauffeur d'air de type* « Ljungström » (a) *et détail des tôles* (b).



le réchauffeur à fumées. La vapeur utilisée est de la vapeur de soutirage et ce réchauffeur à vapeur contribue à l'amélioration du rendement du cycle.

Parmi les réchauffeurs d'air les plus utilisés, on trouve les types suivants.

— *Réchauffeurs d'air à tubes.* Ce sont les plus courants. Ils sont fondés sur le principe d'échange de chaleur au travers d'une paroi : plaques ou tubes. Dans le cas de faisceaux tubulaires, l'air de soufflage peut circuler à l'intérieur ou à l'extérieur de tubes. Les parties froides peuvent être construites en tube Pyrex, insensibles à la corrosion. On utilise aussi des tubes en fonte, compte tenu de la bonne résistance de ce matériau à la corrosion acide.

— *Réchauffeurs à régénération.* Ces réchauffeurs sont fondés sur le principe d'une accumulation de la chaleur des gaz de combustion dans une masse de métal pour être transférée ensuite vers le fluide à réchauffer, en l'occurrence l'air de soufflage. Les masses jouant le rôle d'accumulateur de chaleur, constitué en général par des empilements de tôles minces, sont mises en contact alternativement avec le fluide chaud et le fluide froid. Ces appareils semblent actuellement en faveur auprès des constructeurs de chaudières (*fig.* 12).

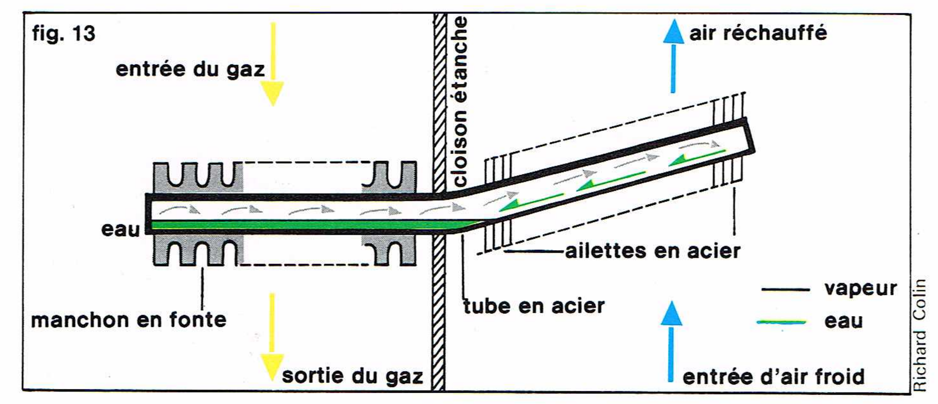
Dans les réchauffeurs de type « Ljungström », les paquets de tôle sont montés sur un rotor tournant, les gaines d'air de soufflage et de fumée étant fixes ; dans les réchauffeurs « Rothemühle », les éléments d'échanges de chaleur sont fixes et ce sont des éléments des gaines d'air de soufflage et de fumées qui sont entraînés en rotation.

— *Réchauffeurs d'air par fluide intermédiaire.* Dans ce type de réchauffeurs, il est fait appel à un fluide intermédiaire, eau ou liquide organique, pour transférer la chaleur des fumées à l'air de soufflage. Ces appareils sont par principe très étanches, contrairement aux réchauffeurs d'air par régénération qui exigent un entretien méticuleux si l'on veut limiter les fuites entre le fluide chaud et le fluide froid.

. Différents types de réchauffeurs ont été imaginés. La transmission de chaleur peut s'effectuer sans changement d'état du liquide de transfert ou au contraire avec vaporisation et condensation.

On ne décrira ici que le réchauffeur *Perkins* constitué d'éléments de tubes indépendants. Chacun de ces tubes comprend une partie horizontale placée dans le conduit de fumées suivie d'une partie inclinée vers le haut dans le circuit d'air de soufflage. Chaque tube est partiellement rempli d'eau et mis sous vide. L'eau se vaporise, côté fumées, dans la partie horizontale, et la vapeur produite passe dans la partie inclinée où elle se condense en réchauffant l'air de soufflage. L'eau de condensation s'écoule dans la partie horizontale pour y être à nouveau vaporisée (*fig.* 13). Ces tubes sont équipés de manchons ailetés pour améliorer les échanges thermiques avec l'air et les fumées. Les ailettes sont en acier sur l'air de soufflage et en fonte sur les fumées pour protéger les tubes de la corrosion acide.

▼ *Figure 13 : principe du réchauffeur d'air par fluide intermédiaire de type* « Perkins ».



Tous les réchauffeurs d'air sur fumées, quel que soit leur type, peuvent être le siège de graves incendies. Ces appareils demandent donc un entretien soigneux (ramonage) ; ils sont généralement munis d'un système d'extinction à l'eau.

Circuit des fumées

Après les économiseurs et les réchauffeurs d'air, on trouve sur le circuit des fumées, avant la cheminée de rejet, des installations de dépoussiérage.

* *Dépoussiéreurs*

Ces installations permettent de réduire la quantité de poussières émises dans l'atmosphère, essentiellement des cendres volantes pour les générateurs de vapeur. La mise en place de dépoussiéreurs est réglementaire.

Le principe des différents types de dépoussiéreurs consiste toujours à imposer aux particules de poussières entraînées par le gaz de combustion une trajectoire qui les écarte du courant principal et qui les achemine vers une zone de collecte ou de dépôt, d'où elles sont évacuées (*fig.* 14).

Suivant la nature de la force utilisée pour agir sur les trajectoires des poussières, on distingue :

— *Les dépoussiéreurs mécaniques*

● *A sédimentation :* l'appareil est constitué par une chambre de décantation faisant seulement appel à la pesanteur pour éliminer les particules. Un élargissement du conduit de fumée est suffisant pour réduire la vitesse et permettre la chute des poussières durant le temps de passage des gaz dans la chambre. Ce procédé ne convient qu'aux petites chaudières et n'arrête que les grosses particules de poussières.

● *A inertie ou à chocs :* l'appareil de ce type combine l'effet de vitesse (augmentée par détente) et celui de brusques changements de direction des fumées.

● *A centrifugation :* les fumées entrent ici dans l'appareil, soit axialement, soit tangentiellement, et prennent un mouvement tourbillonnaire. Elles s'échappent par l'axe tandis que les poussières en suspension qui sont le siège d'une force centrifuge sont plaquées sur une paroi d'où elles tombent par gravité.

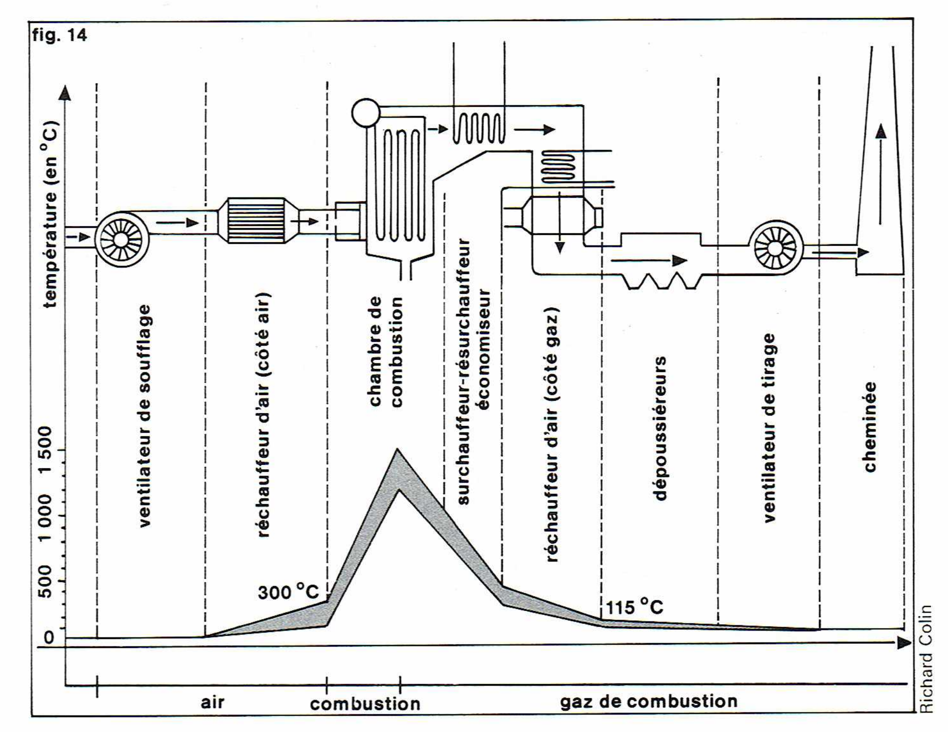
— *Les dépoussiéreurs hydrauliques*

Les appareils fonctionnant suivant ce principe sont en fait des laveurs de fumées qui opèrent un transfert de poussières d'une suspension gazeuse à une suspension liquide.

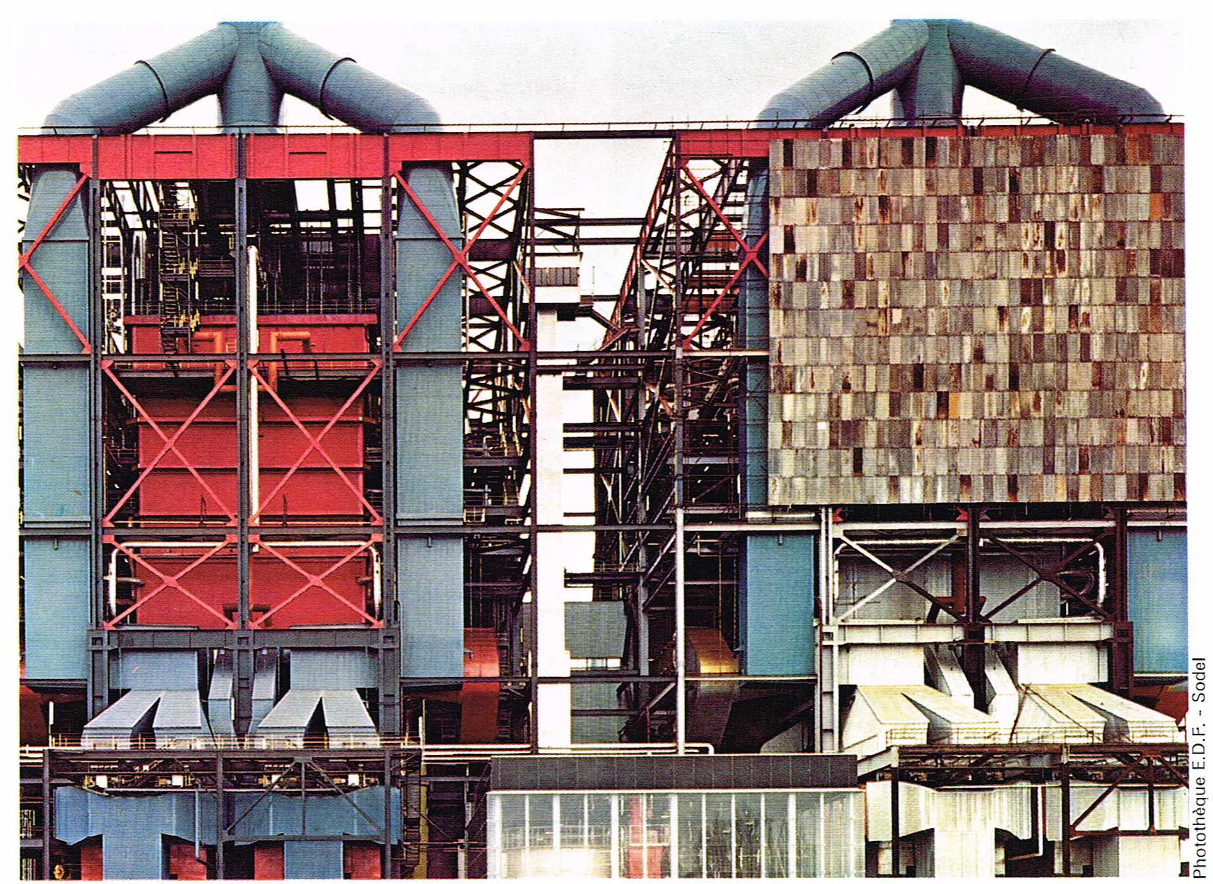
Le lavage peut se faire par barbotage ou par arrosage. Une des difficultés des dépoussiéreurs hydrauliques est l'humidification des fumées qui résulte de leur lavage et qui limite les conditions d'emploi de ce type d'appareil. On peut combiner ce principe avec celui du dépoussiéreur à inertie en retenant les poussières par des surfaces mouillées sur lesquelles elles viennent frapper.

— *Les dépoussiéreurs électriques*

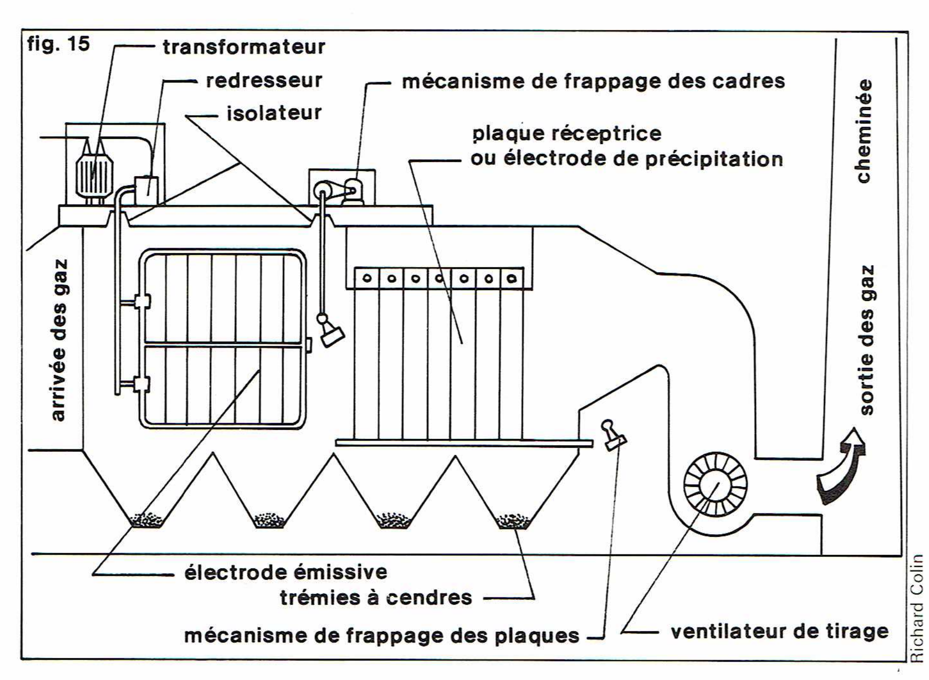
Ici, on communique aux particules une charge électrique qui se déplace vers une surface réceptrice (*fig.* 15).

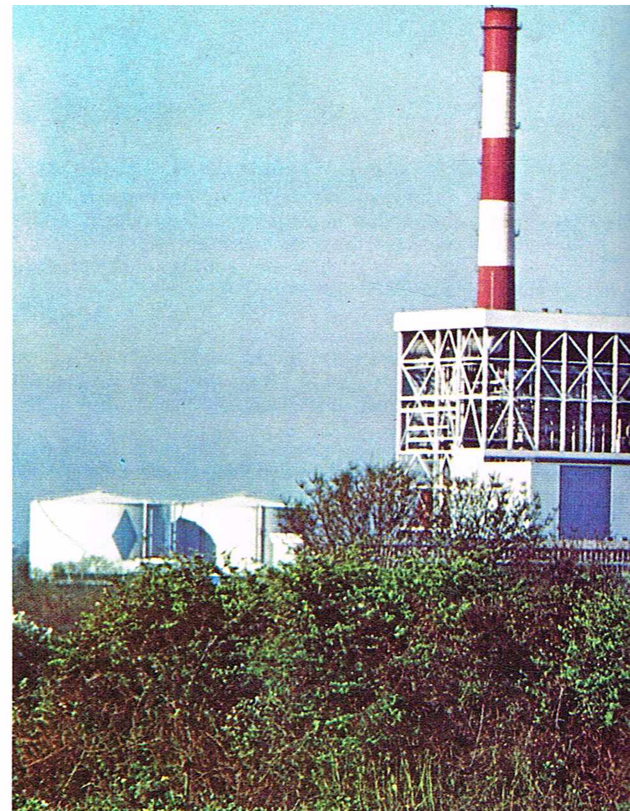


▲ ***Figure 14 :***
a) ***représentation schématique de l'ensemble du circuit air-gaz d'une chaudière ;***
b) ***variation de température à l'intérieur des différentes pièces de ce circuit.***

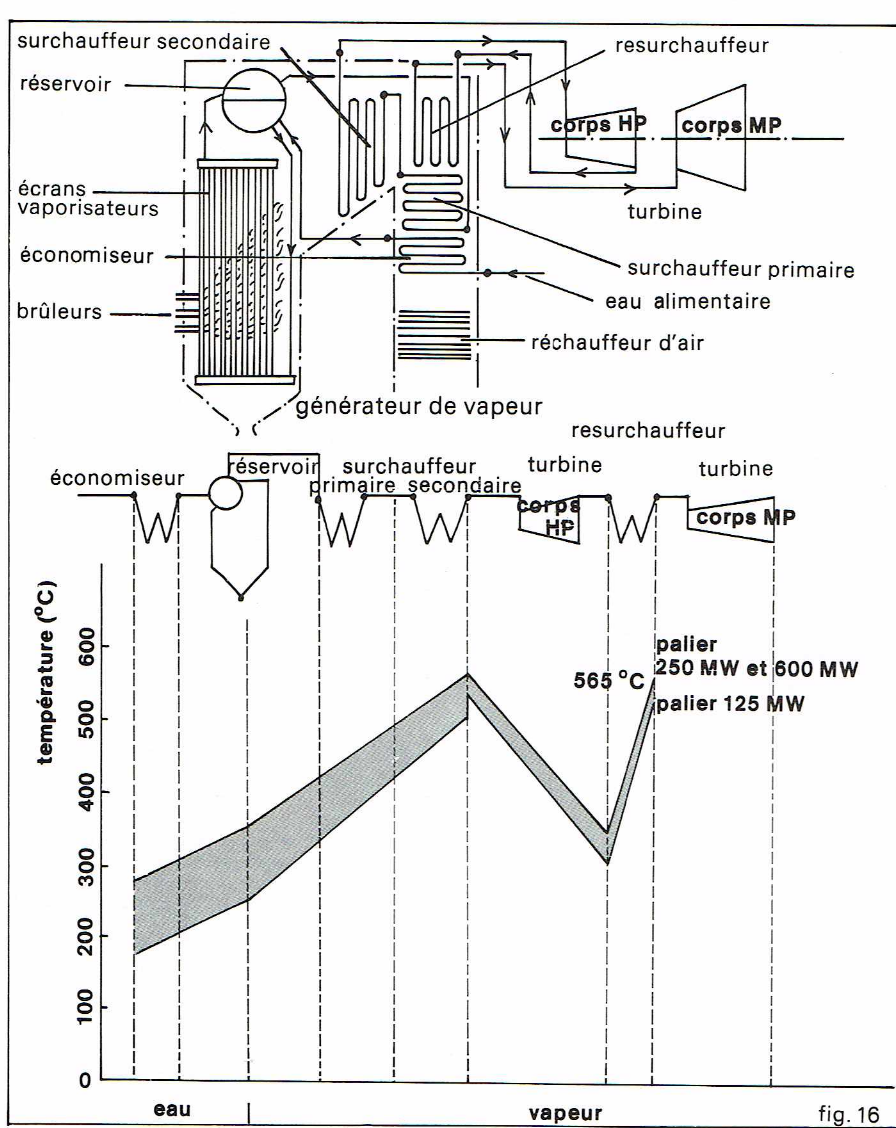


◀ ***La présence de dépoussiéreurs avant la cheminée sur le circuit des fumées d'une chaudière est obligatoire. Elle permet de réduire la quantité de poussières et surtout de cendres volantes rejetées dans l'atmosphère. Ici, les dépoussiéreurs des 4e et 5e tranches de la centrale thermique de Nantes Cheviré.***





▲▼ *Figure 15 : représentation schématique d'un* **dépoussiéreur électrique** *(vue en élévation).*
Figure 16 : a) *représentation schématique de l'ensemble du circuit* eau-vapeur *d'une chaudière ;*
b) *variation de température à l'intérieur de différentes pièces de ce circuit.*



Les dépoussiéreurs de ce type ont un volume considérable parce que les fumées doivent y circuler à très faible vitesse. Ils sont composés d'un caisson, d'électrodes émissives alimentées en courant continu haute tension, d'électrodes de précipitation ou plaques réceptrices et de mécanismes de frappage dont le rôle est de « secouer » de manière cadencée les électrodes des deux types pour détacher les poussières et leur permettre ainsi de tomber dans des trémies à cendres.

* *Cheminées*

Les cheminées des générateurs de vapeur sont élevées de façon à permettre une grande dispersion des gaz de combustion et de leurs poussières résiduelles dans l'atmosphère. Leur hauteur atteint 250 m pour les dernières tranches E. D. F. de 600 ou 700 MW.

Ces cheminées, communes en général à plusieurs générateurs de vapeur, sont en béton ou en tôle. La brique, très usitée autrefois, n'est guère utilisée aujourd'hui.

Circuit eau-vapeur

L'eau d'alimentation de la chaudière, ou eau alimentaire, traverse, avant de ressortir sous forme de vapeur éventuellement surchauffée, un circuit comportant divers échangeurs constitués en grande partie par des faisceaux de tubes. Cet ensemble d'échangeurs a pour but de transférer de la façon la plus méthodique possible la chaleur créée par la combustion dans le foyer à l'eau alimentaire pour transformer cette dernière en vapeur.

On va donc rencontrer successivement l'économiseur, le réservoir, les faisceaux vaporisateur, surchauffeur et éventuellement resurchauffeur (*fig.* 16).

Économiseur

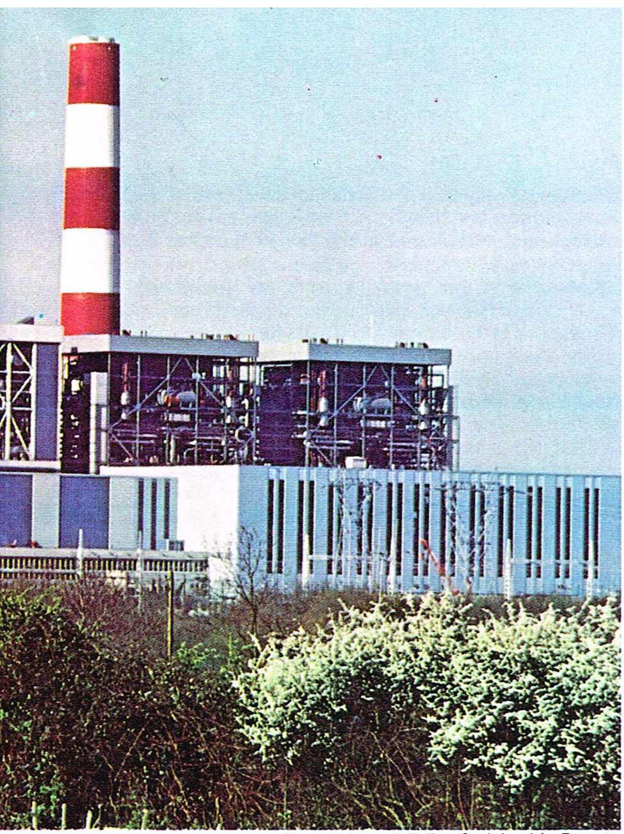
Avant son introduction dans le réservoir supérieur du générateur de vapeur, l'eau alimentaire subit un dernier réchauffage en traversant un échangeur de chaleur disposé sur le trajet des gaz de combustion. Cet échangeur est appelé *économiseur*, car il contribue essentiellement à l'amélioration du rendement en récupérant une partie des calories restées dans les gaz de combustion.

L'échange de chaleur se fait par convection. Les tubes d'eau, en acier pour tenir la pression généralement élevée, portent des manchons à ailettes de façon à améliorer l'échange thermique avec les fumées. Ces manchons sont généralement en fonte pour résister à la corrosion acide.

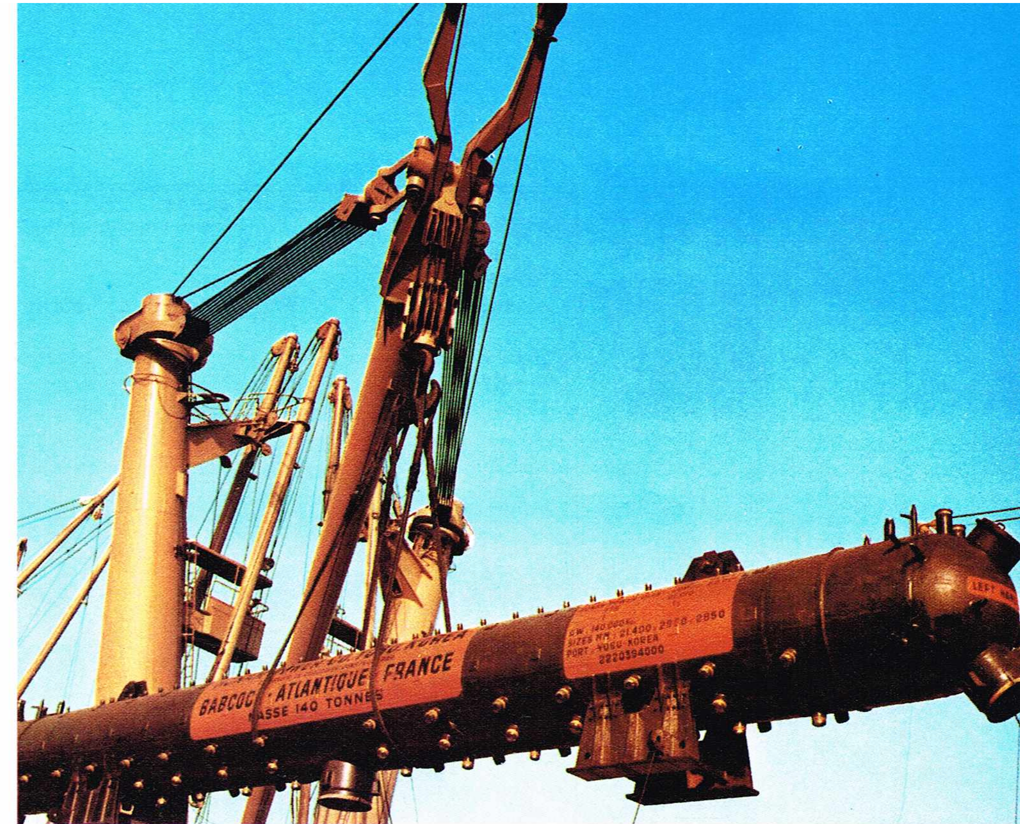
L'économiseur est dimensionné pour qu'en aucun cas il n'y ait vaporisation de l'eau dans cet échangeur.

Réservoir et ses accessoires - La circulation

Ce réservoir, appelé aussi *ballon*, est une enceinte dans laquelle se trouvent réunies la phase liquide et la phase vapeur de l'eau du générateur. On y trouve l'arrivée d'eau alimentaire, les arrivées de l'émulsion eau-vapeur en pro-



Photothèque E.D.F. - Sodel - J.L. Desnos



Fives - Cail Babcock

▲ *A gauche, vue générale de la centrale thermique de Cordemais près de Nantes ; la présence de cheminées élevées (ici, environ 250 m) permet une grande dispersion des gaz de combustion. A droite, levage d'un réservoir de 140 tonnes destiné à l'aménagement d'une chaudière de 300 MW en Corée.*

venance des faisceaux vaporisateurs, les départs d'eau vers ces mêmes faisceaux et les départs de la vapeur vers le surchauffeur. Il se trouve à la partie supérieure de la chaudière.

Il y a en permanence une circulation de l'eau et de l'émulsion. Cette circulation peut s'établir spontanément du fait de la différence de densité entre l'eau et l'émulsion, et on dit alors que la chaudière fonctionne en *circulation naturelle* (*fig.* 17a).

On peut aider cette circulation en intercalant une ou plusieurs pompes de circulation dans les tubes de descente d'alimentation des faisceaux vaporisateurs. On parle alors de *circulation contrôlée* ou *assistée* (*fig.* 17b).

Dans ces deux systèmes, la séparation de l'eau et de la vapeur se fait dans le ballon.

Il existe un troisième type de chaudières, dites à *circulation forcée*. Ces chaudières n'ont plus de réservoir ; elles sont constituées seulement des différents faisceaux disposés en série ou en série-parallèle. La pompe alimentaire refoule l'eau dans ces faisceaux où successivement elle se vaporise et se surchauffe. Ce sont des chaudières à passage unique *(once-through)* [*fig.* 17c].

Le réservoir d'une chaudière est un élément essentiel de celle-ci en raison de ses dimensions, de son poids, de son coût élevé et des délais importants de réparation ou de remplacement. Sa conception et sa construction sont en conséquence particulièrement soignées.

Son habillage externe et interne est complexe. Il comporte de nombreux bossages pour permettre le raccordement des soupapes de sûreté, des diverses tuyauteries principales d'arrivée et de départ d'eau, d'émulsion et de vapeur, des tuyauteries auxiliaires d'évent, de purge, d'injection de réactifs, de prise d'échantillons, etc., et enfin des appareils de mesure du niveau.

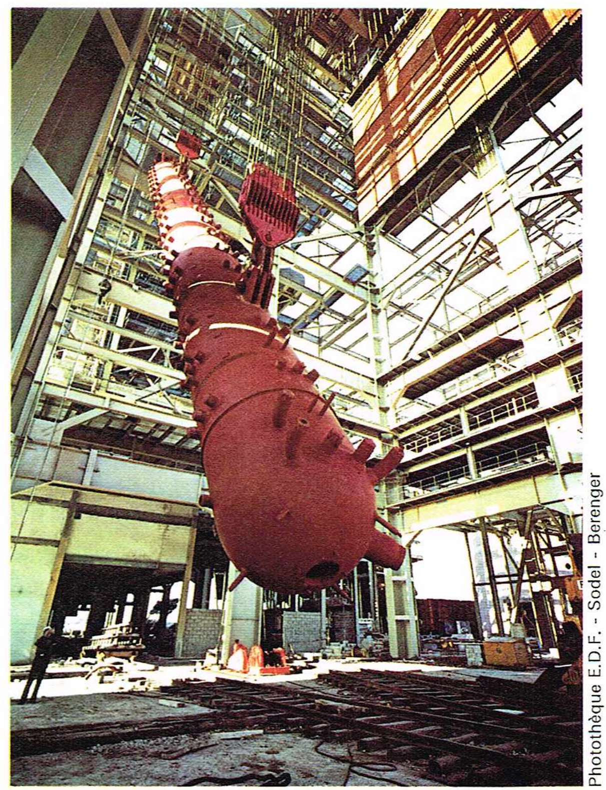
L'habillage interne est constitué par des écrans, destinés à guider la circulation des fluides, et par des épurateurs de vapeur. Les épurateurs de vapeur sont de deux types. On trouve d'abord les *séparateurs* qui effectuent une première séparation de l'eau et de la vapeur, ensuite les *sécheurs* qui éliminent de la vapeur l'eau restante.

Compte tenu du poids de ce réservoir, de toutes ses liaisons avec les différents faisceaux tubulaires, de sa localisation au point le plus haut de la chaudière, et de sa température de fonctionnement élevée, on conçoit bien que c'est un des éléments importants du générateur de vapeur.

Faisceaux vaporisateurs

Ces faisceaux sont, dans les chaudières modernes, constitués principalement par des écrans d'eau tapissant les parois de la chambre de combustion et donc exposés au rayonnement (chaudières radiantes) [*fig.* 18].

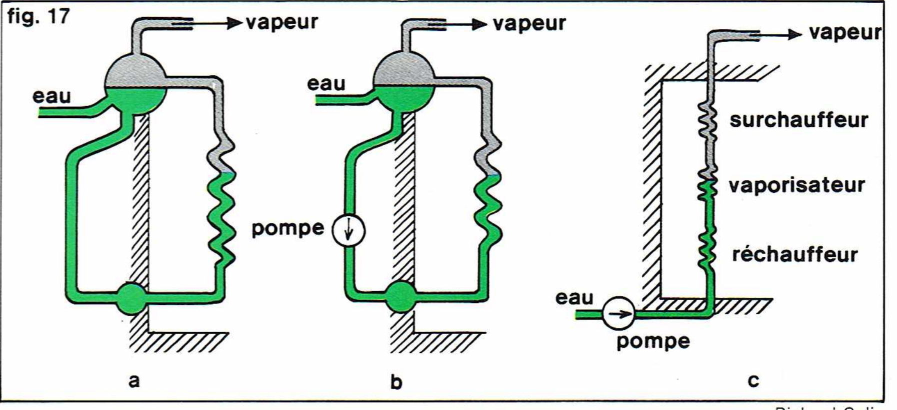
Ces faisceaux sont alimentés à partir du réservoir par des colonnes de descente d'eau extérieures au foyer. Ces



Photothèque E.D.F. - Sodel - Berenger

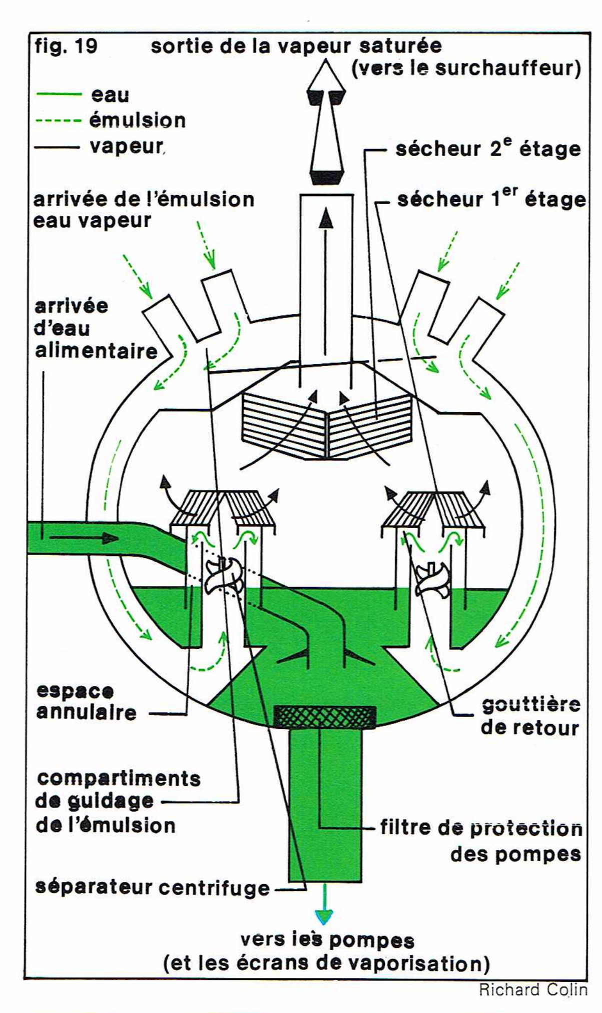
◀ *Mise en place du réservoir (230 tonnes) de la chaudière au cours de l'installation de la centrale thermique d'Aramon (Gard) [2 × 700 MW].*

▼ *Figure 17 : la circulation de l'eau dans les chaudières ; a) circulation naturelle ; b) circulation contrôlée ou assistée ; c) circulation forcée (once-through).*



Richard Colin

▶ *Figure 19 : coupe transversale d'un réservoir supérieur d'un générateur de vapeur à circulation contrôlée.*



▼ *Figure 18 : ce qui se passe dans un tube de chaudière.*

fig. 18

vapeur

T saturée

1

0

température des tubes

température du fluide

températures

titre *x*

vapeur surchauffée (1 seule phase)

vapeur saturée

ébullition par film

ébullition partielle par film

ébullition généralisée

ébullition de surface

échauffement de l'eau (1 seule phase)

zone d'émulsion (2 phases)

liquide

Richard Colin

colonnes alimentent des collecteurs inférieurs sur lesquels sont piqués les tubes. Sur les grandes chaudières, des collecteurs supérieurs réunissent les tubes et conduisent l'émulsion eau-vapeur dégagée dans ceux-ci vers le réservoir.

Surchauffeur et resurchauffeur

Les faisceaux surchauffeur et resurchauffeur sont traversés par les gaz de combustion qui sortent du foyer et sont donc soumis de ce fait aux températures les plus élevées.

Dans les tubes du surchauffeur circule la vapeur saturée en provenance du réservoir de la chaudière. Les tubes du resurchauffeur sont parcourus par de la vapeur déjà détendue dans une partie de la turbine. Le rôle de cet appareil sera explicité dans le chapitre traitant des turbines à vapeur.

La température élevée requise pour la vapeur surchauffée (amélioration du cycle thermodynamique) trouve sa limite dans la mauvaise tenue des métaux aux températures élevées. La température de 570 °C est une frontière qui est rarement dépassée dans les applications industrielles.

Matériaux

Le choix de l'acier des tubes des divers échangeurs rencontrés dans une chaudière dépend de la température du métal donnée par le calcul. Le problème est particulièrement ardu pour les faisceaux surchauffeur et resurchauffeur.

L'acier doux peut convenir jusqu'à 450 °C. Au-delà et jusqu'à 540 °C environ, on utilise des aciers « ferritiques » qui contiennent de faibles proportions de chrome et de molybdène (2,25 % Cr-0,5 % Mo par exemple). Au-delà de 540 °C, il faut utiliser des aciers « austénitiques » qui sont de véritables aciers inoxydables et qui contiennent une forte teneur de chrome (18 %) et de nickel (8 %).

Les supports de tubes de surchauffeur, moins bien refroidis que les tubes, fonctionnent à des températures bien supérieures et sont réalisés en alliages réfractaires constitués par des aciers fortement alliés Ni-Cr.

Les différents assemblages à réaliser sont effectués dans les chaudières modernes par soudure.

Problème de fonctionnement

L'exploitation des chaudières classiques soulève différents problèmes de fonctionnement parmi lesquels on peut citer :

Lecture et réglage du niveau

Ce problème existe dans toutes les chaudières qui ont un réservoir. La chaudière, dans ce cas, dispose d'un volant d'eau qui lui permet de fonctionner pendant un certain temps en cas de rupture de tube. Ce délai est mis à profit pour mettre la chaudière « bas les feux ».

Sur les chaudières modernes, le volant d'eau est faible et il est donc nécessaire de disposer de moyens de surveillance efficaces du niveau.

On trouve des appareils à lecture directe dont l'information est retransmise en salle de commande par un jeu de miroirs ou par télévision. Il existe aussi de nombreux types d'indicateurs à distance qui transmettent leur information par signaux électriques. Par mesure de sécurité, les installations comportent généralement plusieurs appareils de lecture de types différents.

Le maintien du niveau dans le réservoir est assuré par une régulation qui ouvre ou ferme à la demande la vanne d'alimentation. Ces régulateurs sont en général électriques et prennent en compte divers paramètres : niveau, débit d'eau entrant, débit d'eau sortant (régulation à trois éléments), de façon à anticiper sur les causes de déséquilibre.

Séparation de l'eau et de la vapeur

Cette séparation est réalisée dans le réservoir supérieur grâce à son habillage intérieur (*fig.* 19).

Des baffles séparent au mieux l'eau et la vapeur qui arrivent mélangées sous forme d'émulsion, avant de traverser les séparateurs et les sécheurs. Les séparateurs fonctionnent généralement suivant le principe du cyclone (centrifugation). Les sécheurs sont constitués très souvent par des plaques perforées constituant un chicanage où

la vapeur abandonne ses dernières traces d'humidité avant de quitter le réservoir.

Pour bien sécher la vapeur, il faut de la place, et l'on imagine bien que celle-ci soit très mesurée dans le coffre d'une chaudière. Un bon séchage de la vapeur est nécessaire, car l'eau entraînée peut être à l'origine d'une érosion importante; de plus elle emporte avec elle des corps dissous que l'on retrouve ensuite dans les réseaux et les appareils où la vapeur est utilisée. A titre d'exemple, si l'entraînement est de 1 gramme d'eau pour 1 kg de vapeur, ce qui est une excellente performance, l'effet cumulé est très important. Si on suppose qu'il s'agit d'une chaudière de 80 t/h fonctionnant avec une eau chargée de 400 mg/l de sels, la vapeur aura entraîné au bout d'une année pleine de marche 275 kg de sels environ.

On voit donc tout l'intérêt d'une bonne séparation de l'émulsion eau-vapeur dans le réservoir, d'une bonne régulation de niveau (un niveau trop haut favorise l'entraînement d'eau par la vapeur, qu'on appelle aussi *primage*) et d'un bon séchage de la vapeur.

Traitement des eaux de chaudières

Une eau de chaudière de mauvaise qualité fait courir à celle-ci de graves dangers. Non seulement, elle accentue les effets néfastes du primage, mais elle le provoque, car la séparation entre liquide et vapeur est fonction de la qualité de l'eau.

De plus, la présence d'oxygène entraîne des corrosions, donc des perforations de tubes et la présence de sels dissous incrustants favorise le phénomène bien connu d'entartrage qui peut conduire également, par surchauffe (coups de feu), à la rupture des tubes.

Le maintien de la qualité d'une eau de chaudière est donc un problème d'exploitation essentiel. L'effort se portera d'une part sur l'utilisation d'une eau d'appoint parfaitement pure et débarrassée d'oxygène. D'autre part, il faudra extraire périodiquement ou en continu de l'eau de la chaudière puisque celle-ci concentre les impuretés apportées par l'eau alimentaire. Il sera donc utilisé des traitements spécifiques pour éliminer l'oxygène et empêcher la formation de dépôts incrustants. Ces traitements consistent à ajouter des additifs dans l'eau d'appoint : par exemple, hydrazine pour éliminer l'oxygène, phosphates de soude pour éviter les dépôts.

Sécurité

Les chaudières présentent des risques d'accident dont on se protège par un certain nombre de dispositions rendues obligatoires en France par la réglementation du Service des Mines.

Une des dispositions essentielles concerne les soupapes de sûreté qui ont pour rôle d'éliminer toute surpression dans la chaudière au-delà du timbre : chaque chaudière doit en comporter au moins deux (*fig.* 20).

Les soupapes de sûreté utilisent presque toujours l'énergie de la vapeur pour assurer leur ouverture et leur fermeture. On en trouve de différents types : à contrepoids, à ressort ou à clapet pilote.

Une obligation importante du Service des Mines concerne les épreuves des générateurs de vapeur, avant la mise en service et ensuite tous les 10 ans, à une pression de 1,5 fois la pression du timbre.

Divers types de chaudières

Le passage de l'eau de l'état liquide à l'état vapeur se fait dans une chaudière en trois étapes : échauffement (économiseur), vaporisation et surchauffe. Si on demande à la chaudière de ne fournir que de la vapeur *saturée*, les deux premières étapes sont suffisantes.

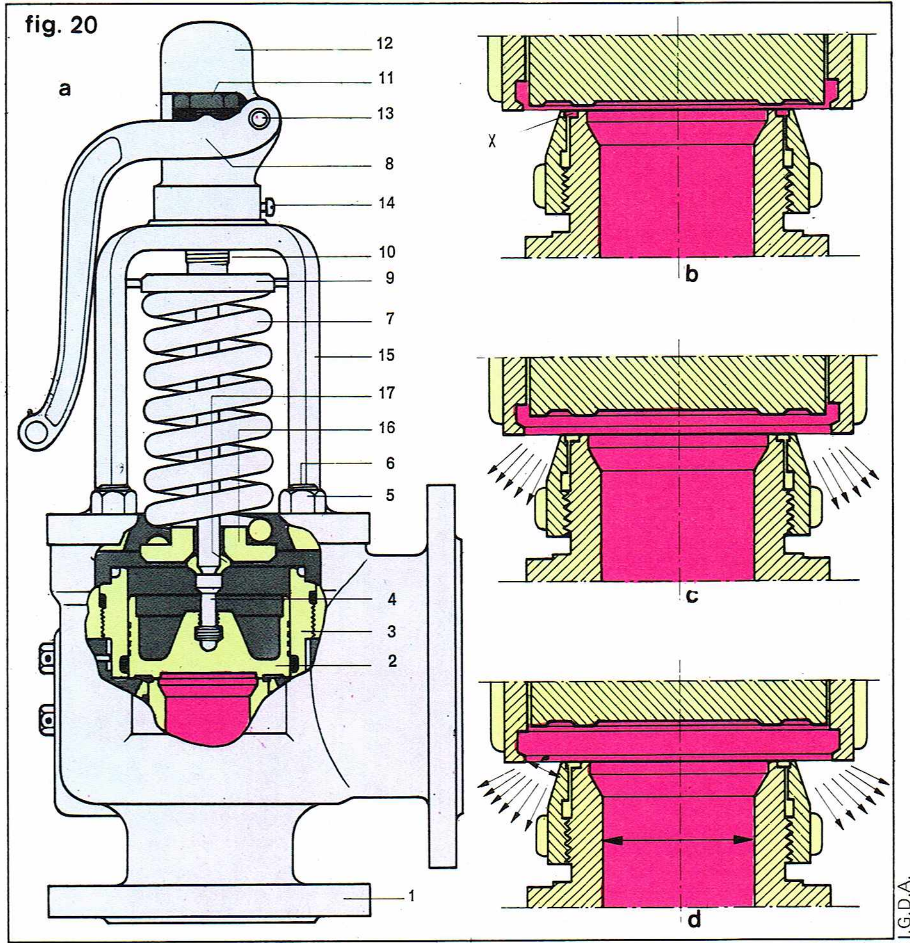
Ces trois opérations physiques s'effectuent dans les chaudières modernes du fait des caractéristiques de vapeur élevées (pression et température) dans des appareils distincts. Cette séparation de fonctions, justifiée par le fait que l'eau passe par trois états différents : liquide, vapeur saturante, vapeur surchauffée, chacun assorti de conditions particulières de température et volume spécifique, se présente même dans les chaudières à passage unique et à circulation forcée *(once-through)*.

Les chaudières sont construites de façon à faire circuler de façon méthodique, c'est-à-dire à contre-courant, le fluide chauffé (circuit eau-vapeur) et le fluide chauffant (circuit air-gaz de combustion). Concevoir une chaudière consiste donc à imbriquer ces deux circuits : eau-vapeur et air-gaz de combustion, avec tous leurs appareils : échangeurs, foyers, ventilateurs, etc., de façon à favoriser au mieux les échanges de chaleur. Il faut en particulier mettre en contact, lors des échanges thermiques, des fluides dont les températures soient assez proches de façon à éviter les transformations « irréversibles » au plan de la thermodynamique. Dans cette perspective, le surchauffeur par exemple devrait être le premier à recevoir les gaz de combustion avec ensuite le vaporisateur, le réchauffeur d'eau et enfin l'économiseur (*fig.* 21).

L'histoire des chaudières obéit aux règles de développement des organismes vivants : évolution et mutation (*fig.* 22).

Au début du siècle, les caractéristiques de la vapeur étaient faibles : vapeur saturante de pression faible ou modérée, et les chaudières se présentaient comme des récipients clos dont la partie inférieure, remplie d'eau, était soumise au rayonnement de la combustion ou au contact des gaz. Pour augmenter la surface de chauffe, on multiplia ensuite le nombre des capacités (chaudières à bouilleur). On réalisa dans le même dessein des chaudières à foyers intérieur et extérieur. L'évolution conduisit ensuite à fabriquer des tubes de fumées intérieurs au bouilleur. La chaudière à foyer intérieur et à tube de fumées a atteint un raffinement technologique remarquable dans les locomotives à vapeur. On utilisa ensuite des tubes d'eau reliant un réservoir principal à plusieurs collecteurs, ce qui permit d'augmenter encore les surfaces d'échanges. En raison de l'augmentation des températures, les réservoirs et collecteurs furent ensuite sortis du foyer.

Les chaudières anciennes, surtout celles chauffées au charbon, avaient des foyers comportant des briquetages très développés. Ces parois réfractaires permettaient d'obtenir des températures de foyer élevées, favorables à la combustion des charbons. Avec l'emploi du fuel-oil et du gaz, la conception des chaudières a évolué vers des foyers constitués par des écrans de tubes vaporisateurs. Les réfractaires ont donc en partie disparu des



▲ *Figure 20 :*
a) *schéma d'une* **soupape de sûreté** *avec un dispositif de tarage constitué d'un ressort de torsion : 1, corps de la soupape ; 2, clapet ; 3, anneau supérieur de réglage et guide du clapet ; 4, tige de commande ; 5, écrou ; 6, goujon ; 7, ressort ; 8, levier à came ; 9, plateau supérieur ; 10, vis de calibrage ; 11, écrou autobloquant ; 12, chapeau ; 13, axe de levier ; 14, vis de serrage du chapeau ; 15, armature ; 16, plateau inférieur ; 17, collier pour la tige de commande.*
b, c, d) *principe de fonctionnement : lorsque la pression de vapeur atteint la pression de tarage, le clapet se soulève et la vapeur se répand dans la petite chambre annulaire* **(x)** *; la force qui en résulte compense celle du ressort, lequel se comprime provoquant ainsi le soulèvement du clapet* **(b)** *qui découvre l'anneau de régulation supérieur ; le fluide est contraint à se diriger vers le bas* **(c)** *; ceci crée une force de réaction supérieure à celle du ressort et le clapet rejoint alors le niveau supérieur* **(d)**.

▶ *Figure 21 : coupe longitudinale de la chaufferie de la 1re tranche de la centrale thermique à charbon pulvérisé de Loire-sur-Rhône près de Vienne (puissance : 250 MW, hauteur : 53,2 m, consommation de charbon : 900 000 t/an, débit de vapeur : 700 t/h).*

▶ *Page ci-contre, figure 22 ; évolution des chaudières : 1, à bouilleur et foyer extérieur ; 2, à bouilleur et foyer intérieur ; 3, à tubes de fumées intérieurs au bouilleur ; 4, à tubes inclinés et collecteurs longitudinaux ; 5, à tubes inclinés et collecteurs transversaux ; 6, à tubes inclinés et collecteur transversal avec mélangeur ; 7, à tubes verticaux ; 8, monotubulaire.*

▼ *Vue intérieure de la chambre de combustion de la centrale de Porcheville (près de Mantes-la-Jolie) [4 × 600 MW] au moment de sa construction.*

GENERATEUR DE VAPEUR

COUPE ÉLÉVATION DE LA CHAUFFERIE

Réservoir
Surchauffeur secondaire
Resurchauffeur
Surchauffeur primaire
Fumées
Dépoussiéreurs de recyclage
Économiseur
Silos à charbon
Air secondaire
Brûleurs
Chambre de combustion
Brûleurs
Ventilateurs de recyclage
écrans de vaporisation
Fumées
Cendrier
Broyeurs
Ventilateurs d'air primaire
Ventilateurs de soufflage

34

Photothèque E.D.F. - Sodel

Photothèque E.D.F. - Sodel - Morceau

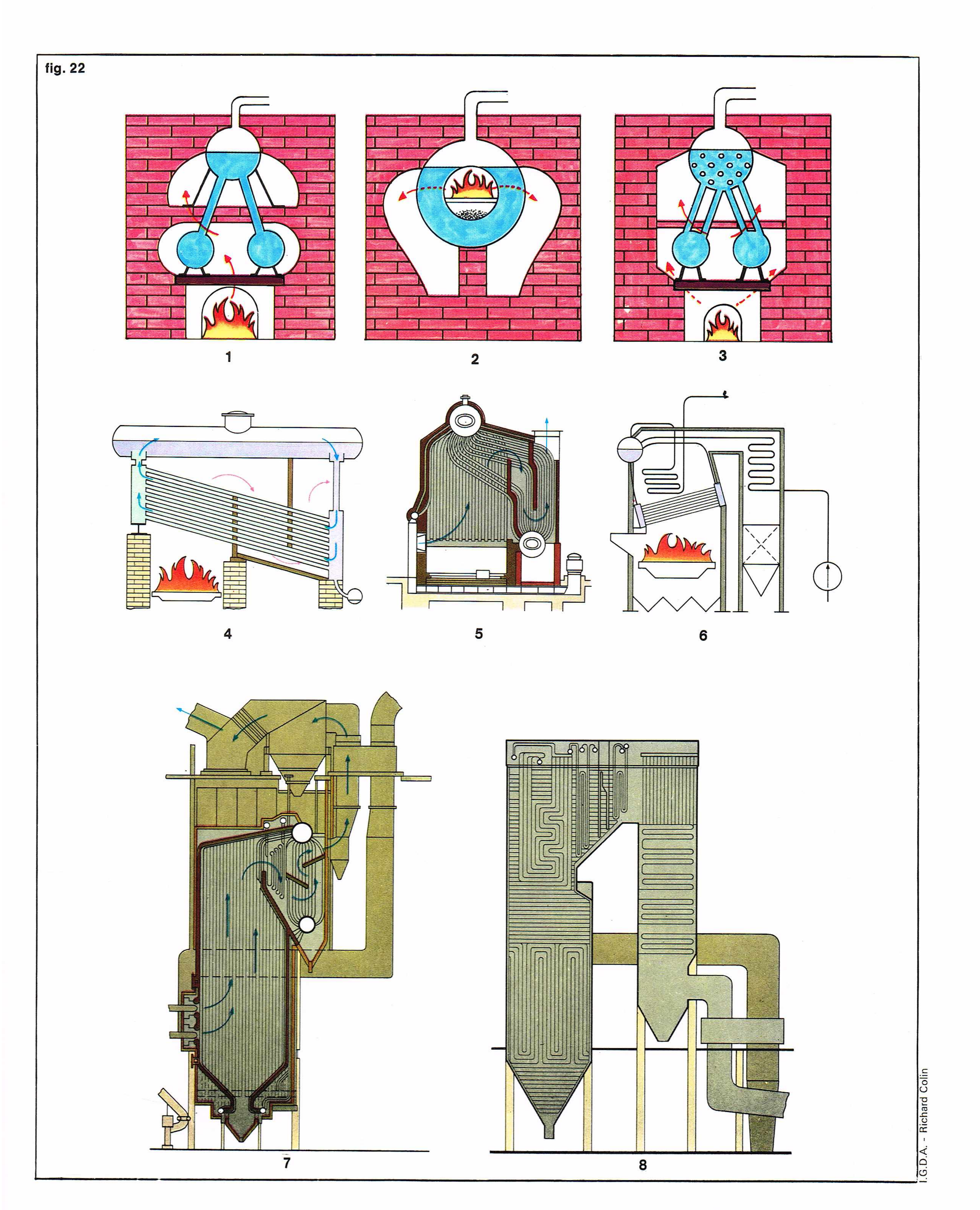
chaudières modernes au profit de l'endurance de ces dernières.

Entre les deux guerres, des progrès importants permirent d'accroître considérablement la pression et le débit des chaudières, grâce à l'emploi d'aciers spéciaux résistant mieux à la température et grâce à l'utilisation de la soudure à l'arc, en particulier dans la fabrication des réservoirs qui étaient auparavant assemblés par rivets.

Après la Seconde Guerre mondiale, les techniques américaines, qui avaient fait des progrès considérables pendant les conflits, ont inspiré la plupart des constructeurs européens dont la production avait été arrêtée. Les chaudières construites alors étaient tubulaires, soit à faisceaux de tubes droits peu inclinés reliés à un réservoir, soit à tubes cintrés (de façon à permettre les dilatations inégales) reliant plusieurs réservoirs. Ce dernier type de chaudière est aujourd'hui très utilisé pour les installations de grande puissance. Le nombre de réservoirs, par souci d'économie et de simplicité, a été réduit. Le foyer est constitué entièrement par des écrans d'eau (chaudières radiantes) ; il n'y a plus de réfractaire mais seulement une isolation calorifique.

La circulation naturelle est la règle pour les installations industrielles en raison de la simplicité qu'elle entraîne. Elle a fait ses preuves jusqu'à 165 bars et même au-dessus, mais elle exige des tubes de diamètre élevé, donc de forte épaisseur, pour tenir la pression, ce qui renchérit la chaudière. Certains constructeurs ont donc construit des chaudières à circulation contrôlée (la circulation étant aidée par une ou plusieurs pompes) ou des chaudières à circulation forcée à passage unique. Notons à ce propos que la circulation forcée est la seule solution possible pour les chaudières fonctionnant au voisinage ou au-dessus du point critique ($t = 374$ °C, P = 220 bars). Dans ces chaudières à circulation contrôlée ou forcée, on peut donc utiliser des tubes plus petits, et donc de moindre épaisseur.

Tous ces perfectionnements ne sont pas nécessaires pour les chaudières de caractéristiques plus modestes. Remarquons cependant que les petites installations largement utilisées dans l'industrie ont beaucoup bénéficié des progrès accomplis sur les grosses chaudières.


fig. 22
1
2
3
4
5
6
7
8

Chaudières nucléaires

Les chaudières classiques convertissent de l'énergie chimique en énergie thermique. Lorsque l'énergie de départ est l'énergie nucléaire pour la même énergie d'arrivée, l'énergie thermique, on utilise par analogie le terme de « chaudières » pour désigner ce type de convertisseurs.

Cette analogie entre *chaudières classiques* et *chaudières nucléaires* peut être poussée très loin. C'est dans le foyer qu'est entretenue la réaction de combustion. De la même façon, le *réacteur* sera le siège de la réaction nucléaire (*fig.* 23).

La principale réaction nucléaire utilisée aujourd'hui dans les réacteurs est, comme on le sait, la réaction de *fission* dont les agents sont les neutrons.

ÉNERGIE DE DÉPART	Combustibles	Réaction	Lieu de la conversion	ÉNERGIE D'ARRIVÉE
CHIMIQUE	fossiles	combustion	foyer	THERMIQUE
NUCLÉAIRE	nucléaires	fission	réacteur	

La différence essentielle entre les deux réactions, combustion et fission, est que, dans un foyer de chaudière, on introduit en continu et indépendamment le combustible d'un côté et l'oxygène (de l'air habituellement) de l'autre côté, dans un rapport approprié. Dans le réacteur au contraire, le combustible nucléaire est mis en place au préalable et le neutron, agent de la réaction et donc analogue à l'oxygène, est produit par la réaction elle-même. La production de neutrons est assurée par un mécanisme de « réaction en chaîne », et, en régime permanent, le nombre de neutrons produits est égal à celui des neutrons qui disparaissent.

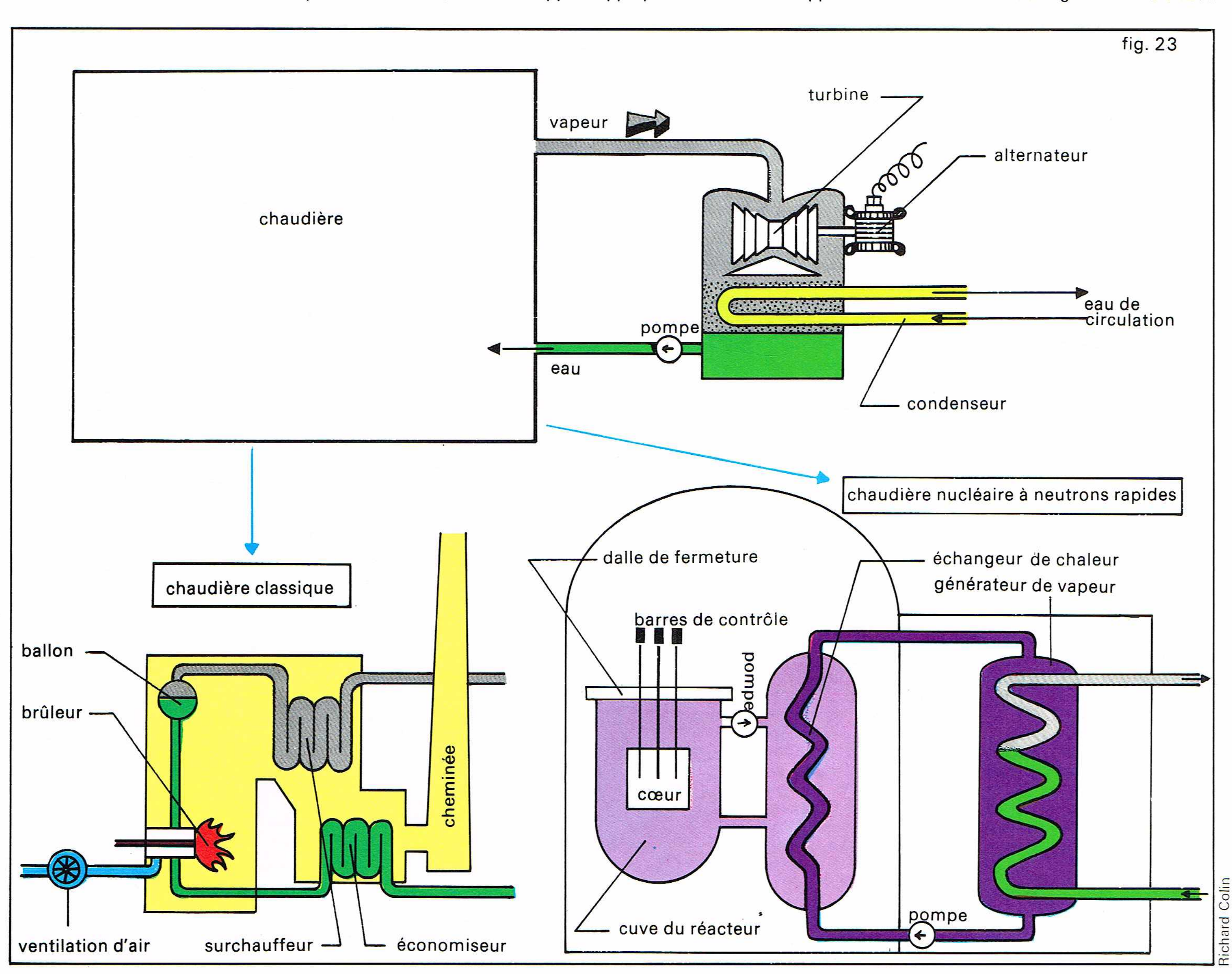
La chaleur dégagée dans le cœur est extraite de celui-ci par un fluide dit réfrigérant ou caloporteur (qui transporte la chaleur). Ce fluide chaud peut être utilisé directement ou envoyé sur un transformateur qui va mettre cette énergie thermique sous une forme plus adaptée à l'utilisation que l'on veut en faire.

On a déjà vu que la vapeur d'eau (surchauffée ou non) était un fluide que les thermiciens savaient bien utiliser. Pour cette raison, les réacteurs sont très souvent associés à des générateurs de vapeur, qui, pour poursuivre l'analogie avec les chaudières classiques, se présentent comme des chaudières de récupération à foyer extérieur (réacteur).

Pour produire de l'énergie thermique bon marché, on est amené à construire des réacteurs de plus en plus puissants. Ces grosses quantités de chaleur sont difficilement utilisables directement, car dans l'état actuel de nos connaissances, l'énergie thermique se transporte mal sous forme de chaleur. On est donc amené à convertir cette chaleur en électricité pour pouvoir la distribuer sur les réseaux électriques existants.

L'énergie nucléaire « civile » passe donc aujourd'hui par la voie de l'électricité. Cette astreinte peut limiter le développement de cette forme d'énergie si on ne trouve

▼ ***Figure 23 :* schéma général d'une centrale électrogène : dans le cas d'une centrale classique comme dans le cas d'une centrale nucléaire, le générateur de vapeur joue le même rôle.**



pas de nombreux débouchés à la chaleur nucléaire. Des recherches sont en cours dans les directions suivantes : utilisation pour le chauffage à basse température, application haute température dans les secteurs suivants : pétrochimie, dessalement, fabrication de combustibles synthétiques, et en particulier de l'hydrogène.

Compte tenu de cette conversion quasi systématique de l'énergie nucléaire en énergie électrique (avec une étape intermédiaire thermique), le lecteur pourra s'étonner que l'on n'ait pas présenté directement les centrales nucléaires électrogènes. L'examen séparé des chaudières nucléaires se justifie pour les raisons suivantes. Les chaudières nucléaires sont étudiées, construites et vendues en tant que telles; elles ont donc une réalité technique et commerciale. Cette réalité ne pourra que s'élargir avec les applications attendues de la chaleur nucléaire.

Anatomie d'un réacteur nucléaire

Le combustible nucléaire, disposé dans des assemblages, constitue le *cœur* du réacteur où il est mélangé avec un matériau dense (solide ou liquide), appelé modérateur, qui a la propriété de ralentir les neutrons et de permettre ainsi la fission.

On a vu en physique nucléaire que la fission pouvait aussi être entretenue avec des neutrons de haute énergie (ou neutrons rapides) tels qu'ils sont libérés après la fission d'un noyau. Dans ce cas, il ne faut pas les ralentir et le réacteur n'a pas besoin de modérateur.

On sait que les réacteurs fonctionnant avec des neutrons lents ou thermiques (car leur énergie correspond à celle de l'agitation thermique du milieu) sont appelés *réacteurs thermiques*, alors que les réacteurs utilisant les neutrons rapides sont appelés naturellement *réacteurs rapides*.

Ainsi, constitué de combustible et le cas échéant d'un modérateur, le cœur d'un réacteur est, pour reprendre l'expression des neutroniciens, un milieu multiplicateur où la réaction en chaîne va pouvoir prendre place. Pour extraire la chaleur dégagée, il faut irriguer le cœur par un fluide réfrigérant.

Un réacteur se présente donc schématiquement comme la réunion, au sein d'une même capacité qui peut prendre des formes très variées suivant le type de réacteurs (cuve, caisson, piscine, etc.), de trois éléments constitutifs fondamentaux : combustible, modérateur (sauf pour les réacteurs rapides) et réfrigérant.

Nous allons examiner à présent les divers matériaux qui peuvent être utilisés pour ces différentes fonctions.

Combustibles

Les combustibles nucléaires sont à base de matière fissile (c'est-à-dire susceptible de subir la fission) : l'uranium ^{235}U et le plutonium (*tableau* IV).

Seul l'uranium ^{235}U existe dans la nature, mélangé à l'uranium ^{238}U dans la proportion très faible de 0,7 %. On peut utiliser l'uranium soit sous la forme d'uranium naturel, soit sous la forme d'uranium enrichi. Dans ce cas, la proportion ^{235}U est plus élevée.

Le plutonium est un élément artificiel qui est fabriqué dans les réacteurs à partir de l'uranium ^{238}U. A noter qu'il est possible de fabriquer un autre élément fissile, isotope de l'uranium ^{233}U, à partir de l'élément thorium ^{232}Th. Cette possibilité n'a pas encore été exploitée industriellement sur une grande échelle.

Ces matériaux, uranium enrichi ou non et plutonium, peuvent être utilisés sous trois formes physico-chimiques différentes : métal, oxyde ou carbure.

Le combustible est enfermé dans des gaines étanches, de formes variables suivant le type de réacteur, qui retiennent les produits de fission et qui le protègent de toute agression externe, en particulier de la corrosion.

En conclusion, un combustible est défini par sa composition et son gainage, sa géométrie et ses caractéristiques fonctionnelles ou *performances*. Les plus classiques sont la *puissance spécifique* qui est la puissance thermique dégagée par 1 kg de combustible (unité : MW/kg) et le *taux de combustion* qui est l'énergie produite en mégawatts-jours (unité : MWj, puissance de 1 MW délivrée pendant 1 jour) par tonne de combustible. Afin de fixer les idées, remarquons que la fission complète de 1 g de matière fissile qui dégage une énergie de $2,3 \cdot 10^4$ kWh représente environ l'énergie correspondant à 1 MWj ($24 \cdot 10^3$ kWh).

Modérateurs

Les modérateurs doivent contenir obligatoirement des atomes légers, c'est-à-dire d'une taille aussi proche que possible de celle des neutrons, pour ralentir ces derniers en un nombre réduit de collisions. (L'échange d'énergie est d'autant meilleur en effet que les corps entrant en collision sont de masses voisines.) Il faut de plus que le modérateur ne soit pas un absorbant de neutrons. Il faut enfin que ce modérateur soit peu coûteux, commode à utiliser, stable et peu agressif chimiquement (*tab.* V).

Les gaz étant exclus, parce qu'ils sont trop peu denses, il ne reste que trois modérateurs vraiment utilisables dans des applications industrielles.

— *L'eau ordinaire* (H_2O) ou eau légère, par opposition à l'eau lourde, qui utilise l'hydrogène comme ralentisseur. Très bon marché, elle est malheureusement trop absorbante de neutrons pour permettre l'emploi de l'uranium naturel, mais, étant un bon fluide réfrigérant, elle peut être utilisée simultanément dans les fonctions de modérateur et de réfrigérant.

— *L'eau lourde* (D_2O) qui utilise comme ralentisseur l'hydrogène lourd ou deutérium. C'est du point de vue neutronique le meilleur modérateur. Handicap : son prix très élevé.

— *Le graphite*. Ce n'est pas un bon modérateur en raison du poids atomique du carbone qui est élevé (12, pour 1 à l'hydrogène et 2 au deutérium), mais c'est un bon matériau de construction, abondant et bon marché.

▼ En haut, tableau IV : caractéristiques des combustibles utilisés dans les réacteurs nucléaires et comparaison avec l'or et le fer. En bas, tableau V : caractéristiques des modérateurs employés pour ralentir les neutrons dans les centrales nucléaires.

Tableau IV
Caractéristiques des combustibles

Caractéristiques	Éléments fissiles			Éléments de comparaison	
	Uranium	Thorium	Plutonium	Or	Fer
Densité des différentes phases cristallines	α 19,04 β 18,11 γ 18,06	α 11,7 β 11,0	α 19,7 β 17,65 γ 17,2	19,3	7,86
Point de fusion (en °C)	1 132	1 750	640	1 063	1 535
Conductibilité thermique à 100 °C (en cal/cm/s · °C)	0,071	0,100	< 0,05	0,705	0,13

Tableau V Caractéristiques des modérateurs

Caractéristiques	Éléments modérateurs			Éléments de comparaison		
	Eau légère H_2O	Eau lourde D_2O	Graphite C	Hydrogène H	Deutérium D	Aluminium Al
Masse atomique ou moléculaire	18	20	12	1,008	2,02	27
Densité	1,0	1,10	1,6	0,009	0,018	2,7
Section efficace macroscopique de diffusion des neutrons σ_s (en barns/atome)	44,4	10,5	4,7	20,3	3,3	1,35
Paramètre de ralentissement ξ*	0,925	0,504	0,158	1,0	0,725	0,071
Section efficace macroscopique d'absorption thermique σ_a (en barns/atome ou molécule)	0,66	$36 \cdot 10^{-6}$	0,004 5	0,33	$2,5 \cdot 10^{-6}$	0,215
Pouvoir de modération $\frac{\sigma_s \cdot \xi}{\sigma_a}$	62	5 000	165	61	5 200	0,45

(*) ξ (sans unité) représente la perte moyenne logarithmique de l'énergie des neutrons par collision.

Tableau VI Caractéristiques des réfrigérants

Caractéristiques	Gaz carbonique CO_2	Eau légère H_2O	Eau lourde D_2O	Sodium Na
Masse atomique	44	18	20	23
Densité ou masse spécifique	1,97 g/l	1	1,10	0,97
Point de fusion (en °C)	—	0	3,82	97,8
Chaleur latente de fusion (en cal/g)	—	532		27,5
Température d'ébullition (en °C)	— 78,5	100	101,4	892
Chaleur latente de vaporisation (en cal/g)	—	536	495	1 005
Capacité calorifique à 100 °C (en cal/g · °C)	0,2	1	~ 1	0,330 5
Conductivité thermique à 100 °C (en kcal/h · m °C)	0,02	0,58	0,55	72

(*) sublimation

▲ *Tableau VI : caractéristiques des réfrigérants utilisés dans les centrales nucléaires.*

Réfrigérant

Les qualités demandées à ce fluide caloporteur sont les suivantes (*tableau* VI) :

— capacité et conductivité calorifiques élevées,
— stabilité chimique sous irradiation,
— pas de capture de neutrons et faible activation,
— pas d'agressivité chimique sur les gaines, le modérateur et les structures.

Les réfrigérants ayant fait l'objet d'applications industrielles sont essentiellement :

— *Gaz :* le gaz carbonique (CO_2) et l'hélium (He). Le premier est courant et bon marché, mais il devient corrosif à toute température. L'hélium est inerte et il jouit de bonnes qualités thermiques ; c'est malheureusement un gaz cher.

— *Eau lourde* et surtout *légère*. On a déjà vu que c'est un bon fluide caloporteur. Il faut malheureusement l'employer sous pression si l'on veut travailler à température élevée.

— *Matériaux liquides :* thermiquement, ce sont les meilleurs caloporteurs. Le sodium, aujourd'hui largement utilisé, semble promis à un bel avenir en dépit de sa réaction chimique avec l'eau.

Filières

Toute combinaison d'un modérateur et d'un caloporteur, et elles sont nombreuses, peut donner naissance à un type de réacteur qui sera en principe capable de brûler les différentes matières fissiles existantes. Ces combinaisons sont appelées filières, car chacune d'entre elles est susceptible d'engendrer toute une lignée de réacteurs, de principe de base identique, mais distincts par la puissance et la réalisation technologique (*tab.* VII).

A la naissance des premiers réacteurs, il y a plus de trente ans, on s'imaginait que le développement de l'énergie nucléaire se ferait au moyen de nombreuses filières. La réalité a été très différente. La mise au point d'une filière s'est révélée être une opération de grande envergure aussi bien dans les moyens techniques à mettre en place que dans les investissements industriels à consentir.

Aujourd'hui une seule filière s'est vraiment imposée :

— la filière *eau légère :* la plus grande partie des réacteurs en service ou en commande dans le monde entier appartiennent à cette filière (environ 85 %).

Deux filières ont fait l'objet d'un développement notable :

— la filière *graphite-gaz* développée surtout en France et en Grande-Bretagne. La construction des réacteurs de ce type s'est arrêtée en 1970 ;

— la filière *eau lourde*. Différents prototypes ont été réalisés en France et en Grande-Bretagne en particulier mais c'est seulement au Canada que cette filière connaît un développement notable.

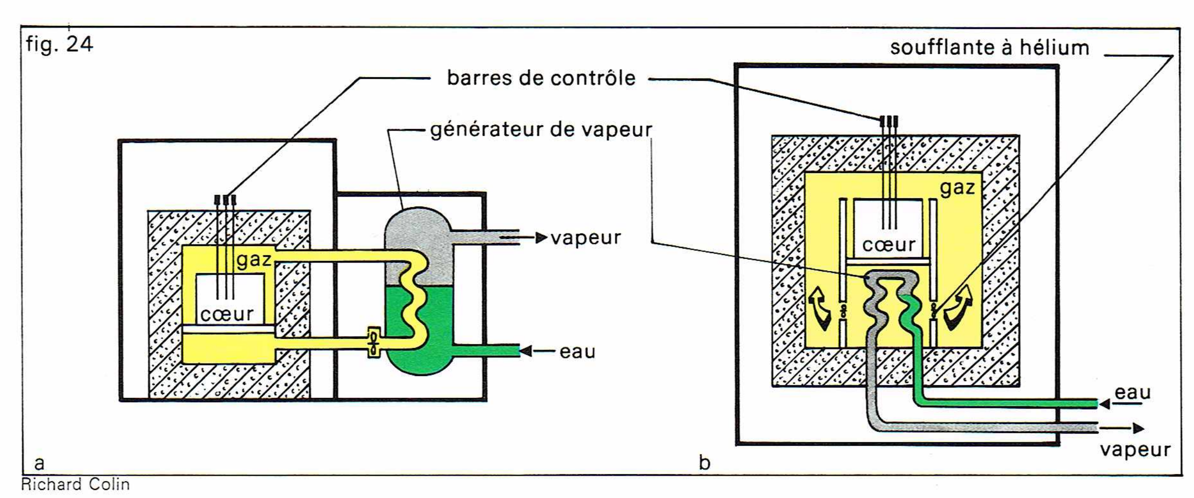
Si l'on quitte le passé pour se projeter vers l'avenir, deux filières seulement sont en cours de développement :

— la filière *neutrons rapides* à sodium qui fait l'objet de réalisations importantes dans la plupart des grands pays industriels ;

Tableau VII
Caractéristiques des différentes filières industrielles ou potentielles

	Filières	GGUN	AGR	PWR	BWR	Eau lourde	HTR	Rapides
Cœur	Combustible	tube métallique	grappe d'oxyde enrichi à 2,5 %	oxyde enrichi à 3 à 5 %	oxyde enrichi à 1,5 à 3 %	oxyde naturel ou peu enrichi	carbure de thorium et d'uranium à 90 %	oxyde de plutonium et d'uranium à 20 %
	Gainage	Mg Zr	acier inoxydable	acier inoxydable ou Zircalloy	acier inoxydable ou Zircalloy	Zircalloy	graphite	acier inoxydable
	Modérateur	graphite	graphite	eau légère	eau légère	eau lourde	graphite	sans
	Caloporteur	CO_2	CO_2	H_2O	H_2O	CO_2 ou D_2O	He	Na
Caractéristiques thermiques	Pression du caloporteur (en bars)	25	40	150	70	60 ou 80	50	< 10
	Température du caloporteur (en °C)	200-400	300-700	280-320	280-310	CO_2 260/500 D_2O 250/300	400-750	400-600
	Puissance spécifique (en MW/t)	3,6	10	34	20	20	70	100
	Puissance volumique (en MW/m^3)	1	2	100	50	15	10	1 000
	Rendement (en %)	30	41	33	32	30	40	40
Performances du combustible	Irradiation-rejet (en MWj/t)	5 000	7 000	30 000	25 000	15 000	80 000	> 60 000
	Temps-séjour (en réacteur/année)	3	7	3	4	3	6	2

▶ *Tableau VII : caractéristiques des principales filières de centrales nucléaires industrielles ou potentielles.*



Richard Colin

◀ ***Figure 24; évolution des réacteurs à graphite-gaz :***
a) réacteur à circuit (Chinon par exemple);
b) réacteur à échangeurs intégrés (Saint-Laurent - Bugey 1).
▼ ***Ci-dessous, cartouche de combustible utilisé dans le réacteur nucléaire à graphite-gaz de Chinon; la cartouche présente des ailettes favorisant les échanges thermiques par convection avec le gaz réfrigérant.***
En bas, machine de chargement pour le remplacement des cartouches de la centrale nucléaire à graphite-gaz de Saint-Laurent-des-Eaux.

— la filière *HTR (High Temperature Reactor)* ou *« haute température »* dont le but avoué est de promouvoir les applications de l'énergie nucléaire à haute température, aussi bien pour la production d'électricité par turbine à gaz (la vapeur d'eau serait abandonnée) que pour de nombreuses opérations dans les industries chimiques ou pétrochimiques.

Divers prototypes appartenant à cette filière ont été réalisés tant en Europe qu'aux États-Unis. On est obligé de constater cependant qu'aujourd'hui les divers programmes lancés marquent le pas.

Nous allons maintenant présenter différentes filières en insistant particulièrement sur les trois suivantes :

— « graphite-gaz », puisque cette filière a connu un développement important en France et a fait l'objet de plusieurs réalisations;

— « eau légère », étant donné le succès que connaît actuellement cette filière dans le monde entier;

— « neutrons rapides » au sodium, étant donné les espérances suscitées par ce type de réacteur et les efforts de développement français.

Chaudières « graphite-gaz » et dérivés

Le premier réacteur ayant fonctionné dans le monde (Chicago, 1943) appartenait à cette filière. Les États-Unis, ensuite, ont construit des réacteurs de ce type pour produire du plutonium destiné aux armements nucléaires (*fig.* 24).

C'est en France et en Angleterre que cette filière a été poussée industriellement pour la production d'électricité. Si l'on excepte les trois réacteurs de Marcoule (G1, G2 et G3) destinés à la production de plutonium « militaire », la France a construit entre 1960 et 1970 six réacteurs de ce type, totalisant une puissance nette de 2 300 MW. Durant cette même période, la Grande-Bretagne a mis en service un parc d'un type appelé *MAGNOX* représentant une puissance de 6 000 MW. Quelques unités supplémentaires ont été produites par ces deux pays à l'exportation.

Lors de la mise en service des centrales équipées par ces réacteurs, diverses difficultés ont conduit les Anglais à faire évoluer cette filière en utilisant de l'uranium enrichi à la place de l'uranium naturel qui était le combustible de cette filière. Le nouveau modèle a reçu le nom d'AGR *(Advanced Gas Cooled Reactor)*.

Les difficultés, dont les principales étaient la corrosion par le gaz carbonique et le coût plus élevé de ces réacteurs qui les pénalisait dans la vente à l'exportation, ont conduit ces deux pays à mettre un terme au développement de cette filière. On ne construit donc plus aujourd'hui de réacteurs de ce type dans le monde. Il faut noter cependant qu'en France, depuis 1972, la quasi-totalité de la production d'électricité nucléaire (7 à 10 % du total suivant les années) a été assurée par des réacteurs de ce type.

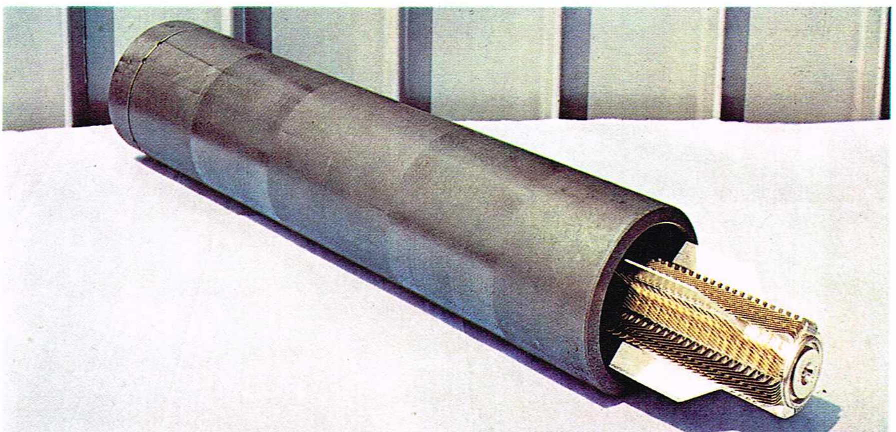
Description d'un réacteur « graphite-gaz »

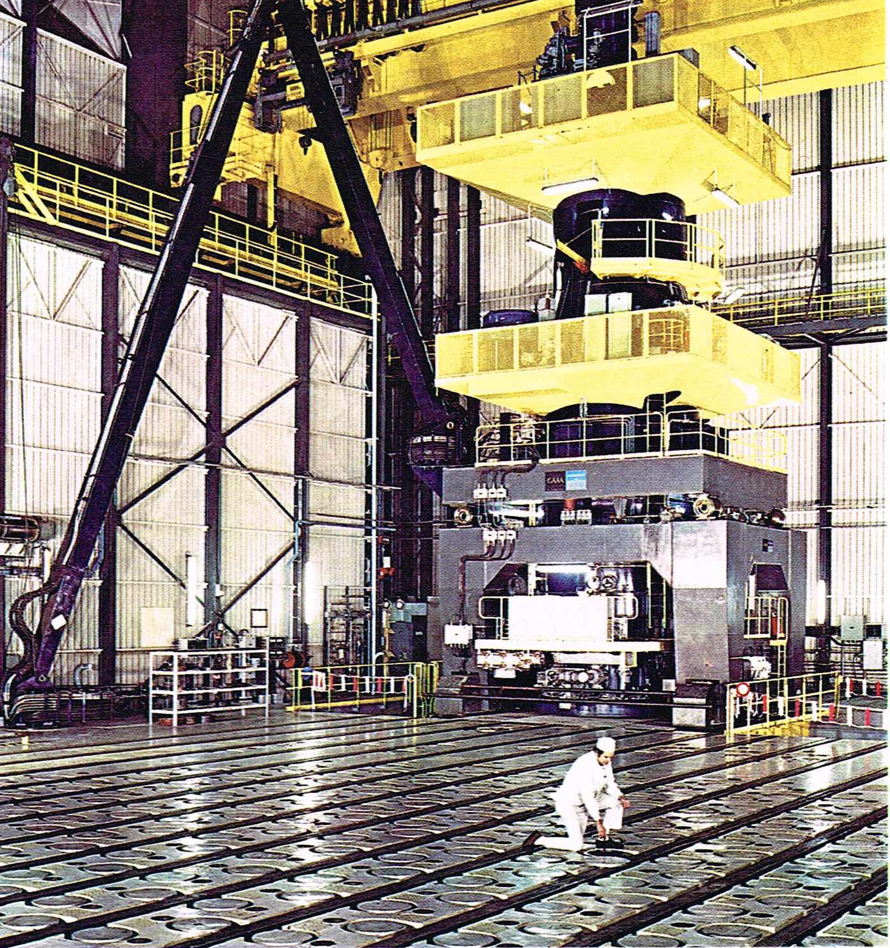
Les trois éléments constitutifs du cœur sont :

— l'uranium naturel, comme combustible;

— le graphite, comme modérateur;

— le gaz carbonique sous pression, comme caloporteur.

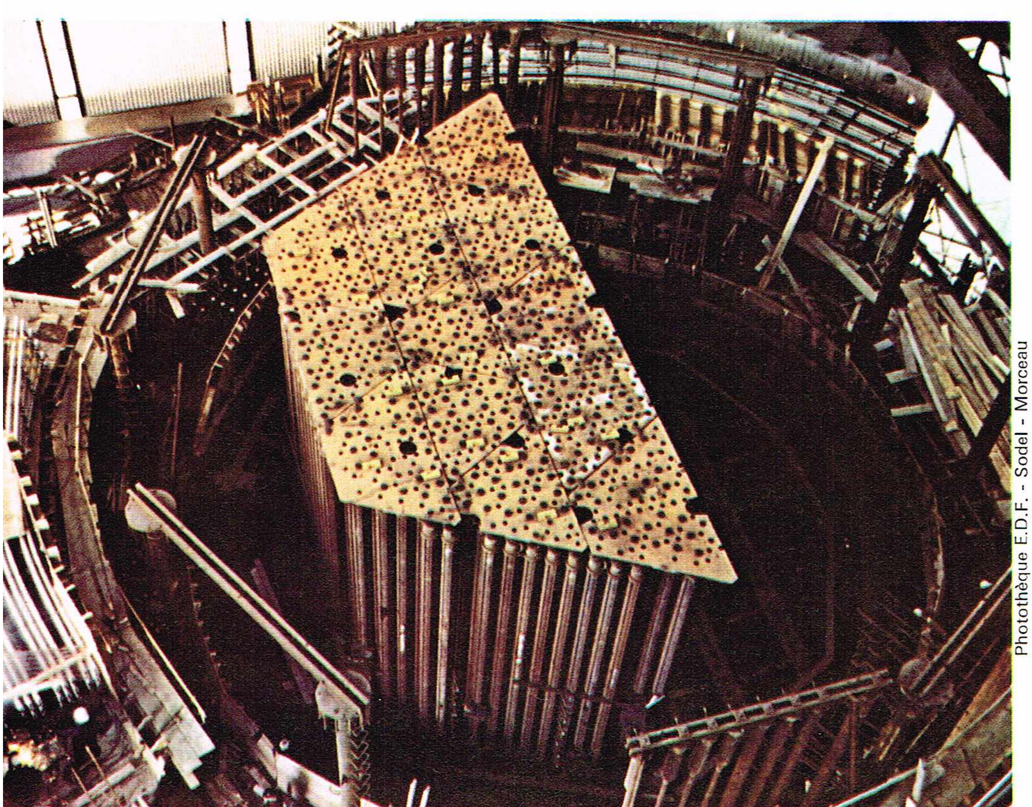

Photothèque E.D.F. - Sodel - F. Roux


Photothèque E.D.F. - Sodel - Brigaud - Morceau

Photothèque E.D.F. - Sodel - Morceau

▲ ***Mise en place de la cuve du réacteur PWR de Bugey 2. Cette cuve d'une masse de 260 tonnes a été réalisée entièrement en usine.***

▼ ***Dans le cas des centrales à graphite-gaz, le caisson peut être soit métallique, comme celui de Bugey 1, soit en béton précontraint; il est généralement fabriqué sur place.***



Photothèque E.D.F. - Sodel - Morceau

* *Combustible*

L'uranium naturel est utilisé sous forme métallique allié avec les divers matériaux pour améliorer ses caractéristiques mécaniques. L'emploi de l'uranium métal reste limité en température (600 °C maximum), car sous cette forme l'uranium est un matériau complexe du fait de ses changements de structure cristalline avec la température. La gaine de protection est réalisée en alliage de magnésium ou d'aluminium, matériaux peu absorbants de neutrons. Ces matériaux, par contre, tiennent mal en température.

Pour s'affranchir des problèmes liés à l'emploi de l'uranium métallique et de ces gainages, les Anglais, dans la filière AGR, ont utilisé l'uranium sous forme d'oxyde et des gaines en acier inoxydable, avec comme conséquence la nécessité d'enrichir l'uranium.

L'élément combustible se présente sous la forme de *cartouche* portant à l'extérieur de nombreuses ailettes pour favoriser les échanges thermiques par convection avec le gaz réfrigérant.

* *Modérateur*

C'est un empilement de blocs de graphite. C'est pour cette raison que les premiers réacteurs ont été baptisés « piles atomiques ». Cette appellation à la fois partielle et impropre (l'énergie de l'atome est soit chimique par ses électrons, soit nucléaire par son noyau) doit être évitée au profit de celle de réacteurs nucléaires.

Dans l'empilement sont ménagés des *canaux* horizontaux ou verticaux suivant les modèles de réacteurs, dans lesquels sont enfilées les cartouches du combustible.

* *Réfrigérant*

Le gaz carbonique (CO_2) est utilisé à une pression comprise entre 15 et 50 bars. Il circule dans les canaux, mis en mouvement par des soufflantes entraînées par une turbine. Sa température, de l'ordre de 250 °C à l'entrée du cœur, est de 400 °C environ à la sortie.

En cas de rupture d'une gaine, il faut craindre une réaction chimique entre l'uranium métallique et le CO_2. On surveille donc en permanence l'étanchéité du gainage par un système d'analyse de prélèvements de gaz à la sortie des canaux (système DRG : détection de rupture de gaine). En cas de défaut, le réacteur est arrêté sans délai.

* *Caisson*

Le cœur est contenu dans une enceinte difficile à réaliser, car elle doit être étanche, résistante à la pression, supporter la température interne (soit directement, soit par calorifugeage) et l'irradiation durant toute la vie du réacteur. Cette enceinte peut être soit métallique, soit en béton précontraint. Les derniers réacteurs construits ont reçu des caissons en béton précontraint, ce matériau étant plus facile à mettre en œuvre et ayant été jugé plus sûr.

* *Échangeurs de chaleur*

Le gaz carbonique chaud, à une température de l'ordre de 400 °C, est envoyé dans les générateurs de vapeur. Il n'a pas été envisagé d'utiliser directement le CO_2 dans une turbine en raison de la température trop faible du gaz. Pour des raisons de sécurité, le circuit d'extraction de chaleur du réacteur comporte plusieurs boucles de circulation de gaz indépendantes.

Les générateurs de vapeur sont disposés, soit à l'extérieur du caisson avec lequel ils sont raccordés par des tuyauteries de circulation du gaz, soit à l'intérieur du caisson. On dit dans cette dernière disposition que le réacteur est de type « intégré », c'est-à-dire que le gaz caloporteur sous pression ne sort pas du caisson. Par analogie avec la terminologie des chaudières classiques, on pourrait dire qu'il s'agit d'une chaudière à foyer intérieur. La solution « intégrée », plus satisfaisante pour la sûreté de l'installation, a été adoptée sur les derniers réacteurs français. Les générateurs de vapeur de ces réacteurs comportent plusieurs sections et on retrouve (voir illustrations) comme sur les générateurs de vapeur classiques un économiseur, un vaporisateur et un surchauffeur.

Aspects spécifiques des réacteurs « graphite-gaz »

Le choix du graphite comme modérateur est imposé par l'utilisation de l'uranium naturel. Pareillement, l'emploi de ce combustible oblige à travailler avec de l'uranium métallique, solution moins favorable que les formes « oxyde » ou « carbure ». L'avantage de cette

filière qui paraissait décisif au début de son développement est de pouvoir utiliser l'uranium naturel. Avec ces réacteurs, on évitait donc l'enrichissement de l'uranium dont la technologie est beaucoup plus difficile à mettre au point que celle de ces réacteurs.

Les réacteurs « graphite-gaz » constituaient une bonne solution pour les pays disposant d'uranium naturel et soucieux d'acquérir rapidement un certain degré d'indépendance énergétique ; c'était le cas en particulier de la France et de la Grande-Bretagne. On a vu que l'expérience n'a pas été concluante.

Les qualités plutôt médiocres du graphite comme modérateur nécessitent un empilement de grande dimension, ce qui ne va pas sans poser de difficiles problèmes de toutes sortes : supportage, tenue de l'empilement, dilatation, etc. Les dimensions finales de ce type de réacteur, même de puissance modeste, excluent par ailleurs des applications de propulsion.

La durée de vie du combustible aussi bien par usure métallurgique (déformation des cartouches) que par usure neutronique (disparition de l'^{235}U) doit être limitée à 3 ou 4 ans. La procédure de renouvellement du combustible adoptée sur ce type de réacteur, compte tenu du grand nombre de cartouches, est celle de la manutention en marche. Le remplacement du combustible est assuré par une machine particulière, appelée *machine de chargement*. Ces machines sont très complexes, étant donné les multiples tâches qu'elles ont mission d'accomplir dans le remplacement des cartouches. Leur fonctionnement est automatique, compte tenu du nombre élevé d'opérations répétitives (25 à 30 000 remplacements des cartouches d'un canal dans la vie du réacteur).

Chaudières à « eau légère »

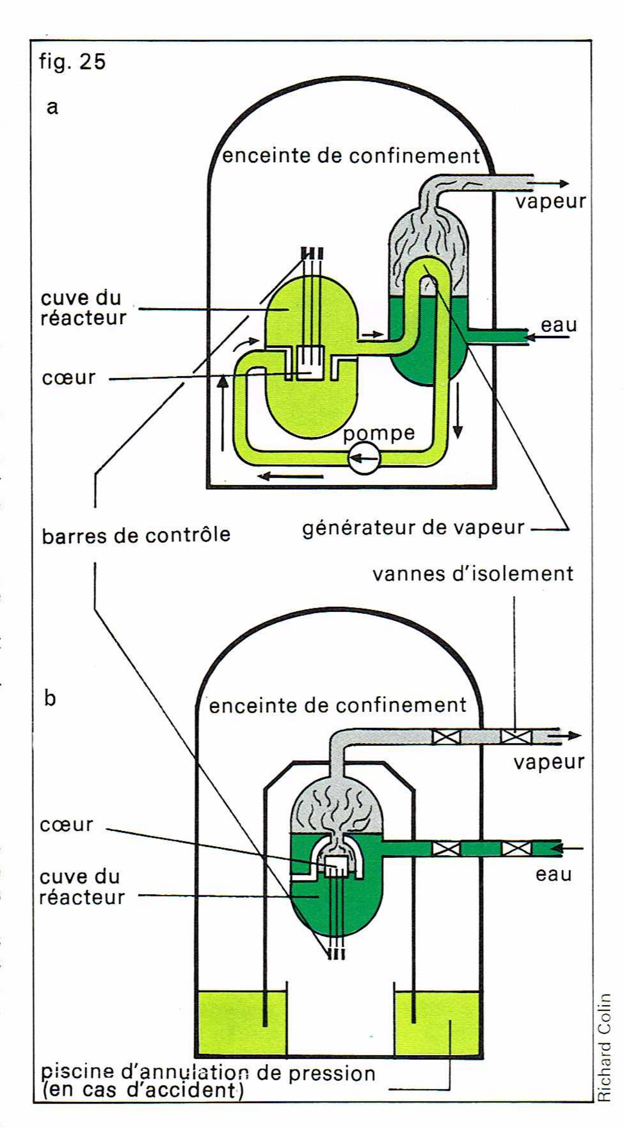
Les réacteurs de ces chaudières utilisent l'eau ordinaire ou eau légère comme modérateur et caloporteur. Le combustible est de l'uranium enrichi, étant donné les caractéristiques d'absorption des neutrons par l'eau.

L'eau étant en revanche un bon ralentisseur des neutrons, ce qui permet, contrairement aux réacteurs graphite-gaz, une construction compacte, et de plus, étant facilement disponible sur toute la surface du globe, cette filière qui l'utilise était particulièrement adaptée à la propulsion navale. Ce type de réacteurs a donc bénéficié d'importants efforts de développement des programmes militaires, d'abord aux États-Unis, ensuite en U. R. S. S., en Grande-Bretagne et en France. Cette forte impulsion reçue au départ, ajoutée à une relative simplicité, explique peut-être leur succès considérable puisque les réacteurs à eau constituent à présent l'essentiel des programmes électronucléaires dans le monde entier.

Deux variantes sont concurremment utilisées dans cette filière. Elles se distinguent par la façon dont la chaleur du cœur est extraite par l'eau. La première variante est celle des réacteurs à *eau sous pression* ou PWR (Pressurized Water Reactor), la seconde celle des réacteurs à *eau bouillante* ou BWR (Boiling Water Reactor) [*fig.* 25].

● Dans les chaudières PWR, l'eau est maintenue dans le réacteur à une pression de 155 bars environ, ce qui permet d'atteindre sans ébullition des températures de 320 °C environ à la sortie du cœur. Cette eau chaude pressurisée est envoyée dans un générateur de vapeur où elle produit la vapeur. Refroidie, elle retourne ensuite vers le réacteur, accomplissant ainsi un circuit fermé. Ce circuit, qui comporte donc le réacteur, les générateurs de vapeur, les pompes de circulation et un pressuriseur pour maintenir l'eau liquide, constitue le *circuit primaire* de la chaudière par opposition au *circuit secondaire* de production et d'utilisation de la vapeur. Une chaudière PWR a donc son foyer (réacteur) distinct des générateurs de vapeur : elle est analogue à une chaudière à foyer indirect. Cette séparation prend une importance particulière dans le cas des chaudières nucléaires, car la radio-activité normale ou accidentelle reste ainsi confinée dans le circuit primaire. On exprime aussi cette idée en disant que ces réacteurs fonctionnent selon un *cycle indirect*.

● Dans la chaudière BWR, on utilise la vaporisation de l'eau, qui comme on le sait absorbe beaucoup de calories, pour extraire la chaleur du cœur. L'eau est donc portée à ébullition pendant sa traversée du cœur. La



◀ *Figure 25 ; les deux types de réacteurs à eau légère :* **a)** *chaudière à eau pressurisée ou PWR ;* **b)** *chaudière à eau bouillante ou BWR.*

pression de fonctionnement est celle de la vapeur saturante aux environs de 280 °C, soit 70 bars. Cette vapeur est ensuite envoyée vers l'utilisation. Il n'y a donc pas de générateur de vapeur distinct dans ce type de chaudière. C'est le réacteur lui-même qui assure la production de vapeur. Les réacteurs BWR fonctionnent donc à *cycle direct*.

Les deux « sous-filières » des réacteurs à eau légère, PWR et BWR, ont connu des succès différents. Actuellement, 70 % des centrales construites ou en construction appartiennent au type PWR, pour 30 % au type BWR. On sait que la France a retenu pour bénéficier de l'effet de série (standardisation, réduction des coûts) un seul type pour ses programmes de réacteurs à eau légère : le PWR.

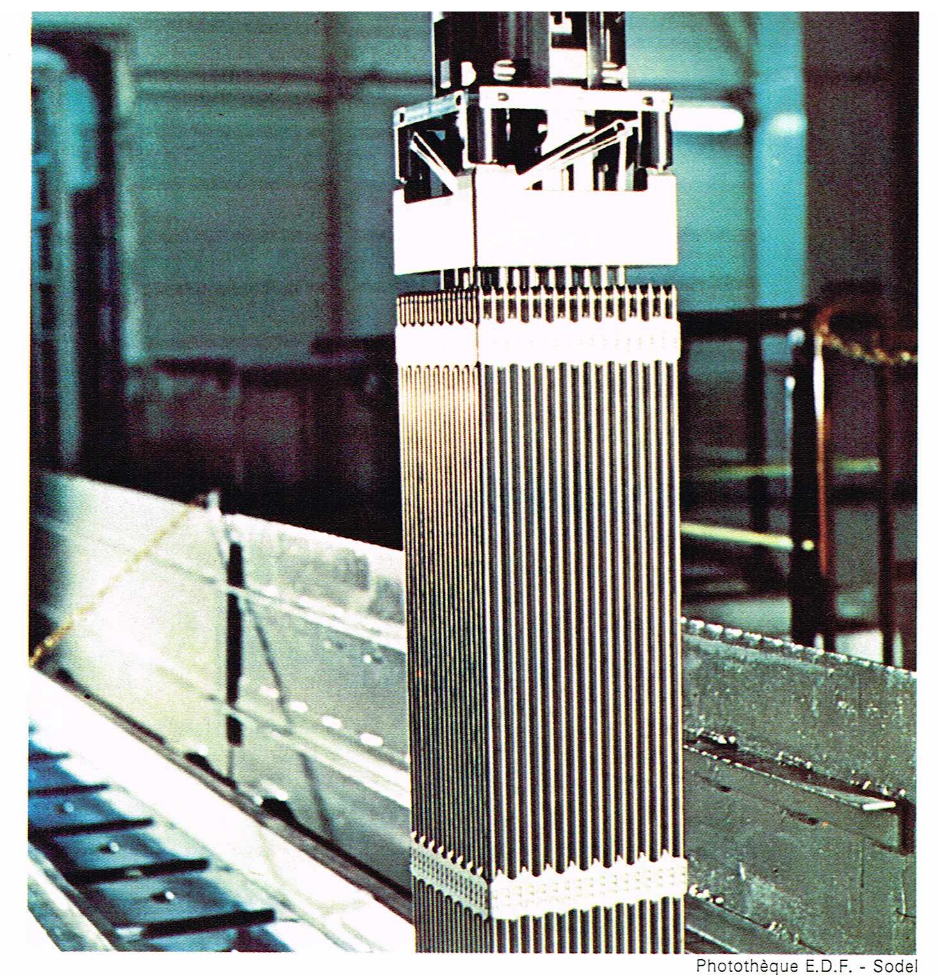
Description d'une chaudière PWR

Le cœur d'un réacteur PWR utilise des assemblages combustibles à uranium enrichi et de l'eau légère comme modérateur et caloporteur. On a vu que ce type de cœur est très compact en comparaison de celui des réacteurs « gaz graphite ».

* *Combustible*

Il est sous la forme de pastilles d'oxyde d'uranium enrichi empilées dans des tubes de Zircalloy, alliage de zirconium, qui forment le gainage. Ces tubes, appelés aussi *crayons*, sont liés entre eux, par paquets pouvant en inclure jusqu'à 300 pour former des *assemblages* sur lesquels s'effectue la manutention. Ces assemblages ont déjà été décrits en détail (voir texte *Réacteurs nucléaires*, volume II de *Physique*).

Le renouvellement du combustible se fait réacteur à l'arrêt, au rythme d'un arrêt par an qui coïncide en général avec l'arrêt pour entretien annuel. On ne renouvelle chaque fois qu'une fraction du combustible, 1/4 ou 1/3


Photothèque E.D.F. - Sodel

▲ ***Télémanipulation d'un assemblage de crayons dans la centrale PWR de Fessenheim 1 (Haut-Rhin) [900 MW].***

du cœur. Un assemblage reste donc dans le réacteur pour une période de 3 à 4 ans. Son taux de combustion est de 30 000 MWj/t environ.

* *Cuve*

C'est la pièce maîtresse du réacteur. Dans une chaudière de 1 000 MW, la cuve a un diamètre de 4 m, une hauteur de 12 m et un poids de 350 t environ. Elle est calculée pour supporter la pression de 155 bars et la température de 300 °C du caloporteur. Elle doit résister également aux rayonnements gamma et aux neutrons issus du cœur. Elle comporte des tubulures qui permettent de la raccorder aux générateurs de vapeur. Chaque générateur a son propre circuit qui est appelé *boucle de refroidissement.* Dans la technologie actuelle, un échangeur peut absorber de 300 à 500 MW suivant les constructeurs. Les réacteurs ont toujours au moins deux boucles pour des raisons de sûreté.

C'est un ensemble mécano-soudé qui se compose d'une cuve proprement dite et d'un couvercle qui se fixe sur la cuve par une série de goujons. Le matériau constitutif est l'acier au carbone, avec, sur la face intérieure, en contact avec le fluide caloporteur, une couche d'acier inoxydable résistant à la corrosion. Cette précaution est nécessaire pour éviter que les produits de la corrosion, qui ne manquerait pas de se produire avec l'acier au carbone, ne viennent se faire activer dans le cœur et ne contaminent tout le circuit.

La réalisation des cuves PWR a posé de difficiles problèmes de fabrication, parmi lesquels on peut citer : soudure de tôles de forte épaisseur (250 mm), dépôt d'acier inoxydable sur l'acier au carbone, traitements thermiques, etc.

Ces cuves étant encore transportables, elles sont entièrement fabriquées en usine. Les ateliers de construction doivent posséder d'énormes presses pour le forgeage et l'emboutissage des éléments, des fours de grande taille pour les traitements thermiques, des moyens spéciaux d'usinage et enfin des appareils de contrôle pour vérifier le haut degré de qualité requis. On conçoit qu'il n'existe qu'un nombre restreint d'entreprises dans le monde susceptibles de mener à bien ces fabrications.

* *Générateurs de vapeur*

Bien que simple dans son principe, le générateur de vapeur d'un PWR pose également des problèmes difficiles de fabrication. Cet appareil pèse 300 t environ et a une hauteur de 20 m pour 4 m de diamètre. C'est essentiellement un faisceau vaporisateur qui est constitué de plusieurs milliers de tubes d'Inconel (alliage à forte teneur de nickel). Il existe plusieurs modèles suivant les constructeurs. Le modèle le plus courant est celui où les tubes sont disposés en U renversé. On trouve dans ce cas au-dessus du faisceau les appareils traditionnels d'épuration de la vapeur : séparateurs et sécheurs. La vapeur délivrée est dans ce cas saturée. Un autre modèle est réalisé par des tubes droits avec un passage unique *(once through) ;* dans ce modèle, la vapeur peut être séchée par une légère surchauffe.

* *Auxiliaires du réacteur PWR*

Pour assurer la circulation du fluide primaire entre la cuve et les échangeurs, chaque boucle de refroidissement comporte une pompe dont le débit unitaire est de l'ordre de 20 000 m^3/h. Le moteur d'entraînement doit avoir une puissance de 6 000 kW ; il est muni d'un volant d'inertie qui évite à la pompe de s'arrêter brutalement en cas de perte d'alimentation électrique.

Le pressuriseur est une capacité munie de chaufferettes électriques. La quantité d'eau contenue dans cette capacité qui est en communication avec le circuit primaire peut être maintenue par ébullition en équilibre thermique avec sa vapeur à la valeur de pression de pressurisation désirée (155 bars).

Plusieurs circuits auxiliaires sont associés au circuit primaire. Les plus importants sont ceux qui ont un rôle de sûreté ; ils assurent en toute circonstance, et en particulier à la suite des accidents les plus divers susceptibles de se produire, l'arrêt de la réaction en chaîne et une réfrigération convenable du cœur.

Description d'une chaudière BWR

Comme dans les chaudières PWR, le cœur d'un réacteur BWR utilise l'uranium enrichi comme combustible et l'eau légère comme modérateur et caloporteur.

* *Combustible*

Il se présente en assemblages de crayons comme dans le PWR. Ceux-ci ont toutefois un diamètre plus élevé (⌀ 14 au lieu de ⌀ 10) et sont plus espacés pour permettre le passage de l'émulsion eau-vapeur.

La puissance spécifique est de l'ordre de 30 % moins élevée sur le BWR que sur le PWR. Ces réacteurs sont donc plus gros à puissance égale.

Les principes de manutention sont identiques à ceux des réacteurs PWR. Le taux de combustion du combustible est légèrement inférieur : 25 000 MWj/t environ.

* *Cuve*

C'est dans la cuve que se produisent simultanément la réaction nucléaire qui dégage de la chaleur et la production de vapeur. Il n'y a donc pas besoin de générateurs de vapeur. L'économie ainsi réalisée conduit à une cuve encore plus imposante que celle des PWR. Il faut en effet loger dans cette cuve les séparateurs et les sécheurs de vapeur. Dans une chaudière de 1 000 MW, ces dimensions atteignent 15 m de haut et 5,5 m de diamètre. La pression de fonctionnement étant seulement de 70 bars, les parois sont plus minces et l'ensemble ne pèse que 550 t.

Ces dimensions rendent très difficile le transport de la cuve en une seule pièce. Elle est donc fabriquée en usine en plusieurs parties qui sont, après transport, assemblées sur le site. Les problèmes de fabrication sont de même nature que ceux des cuves de PWR.

* *Auxiliaires du réacteur BWR*

Dans les différents modèles proposés par les constructeurs, on trouve des pompes de circulation dont le rôle est, comme dans les chaudières classiques, de favoriser la circulation de l'émulsion qui serait insuffisante avec la simple convection naturelle. Ces pompes peuvent être montées directement sur la cuve, le rouet étant à l'intérieur, le moteur à l'extérieur. Ce dernier est dans ce cas de type étanche. Les pompes peuvent être aussi complètement extérieures et raccordées à la cuve par des boucles. Elles sont associées dans ce cas à des éjecteurs qui fonctionnent comme des amplificateurs de débit.

Les réacteurs BWR sont également munis de circuits de sécurité de principe assez semblable à ceux des PWR.

Les réacteurs BWR comptent enfin des installations de stockage et de traitement des effluents radio-actifs sensiblement plus importantes que celles des PWR. C'est une conséquence du « cycle direct ». Dans les PWR, la radio-activité reste confinée dans le circuit primaire, alors que, dans les BWR, une partie est entraînée avec la vapeur, et on la retrouve dans les circuits d'utilisation.

Paolo Koch - Rapho

▲ *Vue extérieure de la centrale nucléaire d'Oskarshamm en Suède ; cette centrale comprend deux tranches de type BWR : la première, mise en service en 1972, développe une puissance de 440 MW ; la deuxième, mise en service en 1974, a une puissance de 580 MW.*

Comparaison des réacteurs PWR et BWR

De prime abord, on peut penser que le réacteur BWR, par la simplicité du cycle direct, conduit à une installation plus ramassée, donc moins coûteuse. Il n'en est rien, car l'introduction de circuits complémentaires, en particulier ceux destinés au stockage et au traitement des effluents radio-actifs, compense les avantages du cycle direct.

Sur le plan commercial, les deux « sous-filières » des chaudières à eau légère étaient donc concurrentielles et, jusqu'en 1970, les commandes dans le monde entier étaient à peu près équilibrées. Depuis, les PWR ont pris nettement l'avantage, dans les chaudières à eau légère, avec environ 70 % des commandes. Pour la propulsion, qui est aujourd'hui, on le sait, essentiellement militaire, seuls les PWR sont utilisés.

Sur le plan technique, en plus des différences déjà signalées, les deux types de réacteurs diffèrent par d'autres aspects tels que : chimie de l'eau, contrôle du réacteur, protections biologiques, etc. Mais ce sont des différences de principe : la technologie d'ensemble reste la même. Cette technologie dérive en grande partie de celle des chaudières classiques, aussi bien dans le domaine de la conception que dans celui de la réalisation. De nombreux appareils tels que les pompes, les échangeurs, les robinets, les réservoirs, etc., sont très souvent identiques ou ne diffèrent que par des détails de réalisation. C'est probablement parce que leur technologie utilise celle des chaudières classiques et la prolonge que le développement des réacteurs à eau légère a connu un si grand succès.

Chaudières à « neutrons rapides » au sodium

Les réacteurs utilisés par ce type de chaudières sont originaux à plusieurs titres (*fig.* 26).

— Les neutrons ne sont pas ralentis et il n'y a donc pas de modérateur.

— La matière fissile utilisée est le plutonium, élément artificiel qui est un « déchet » des réacteurs thermiques.

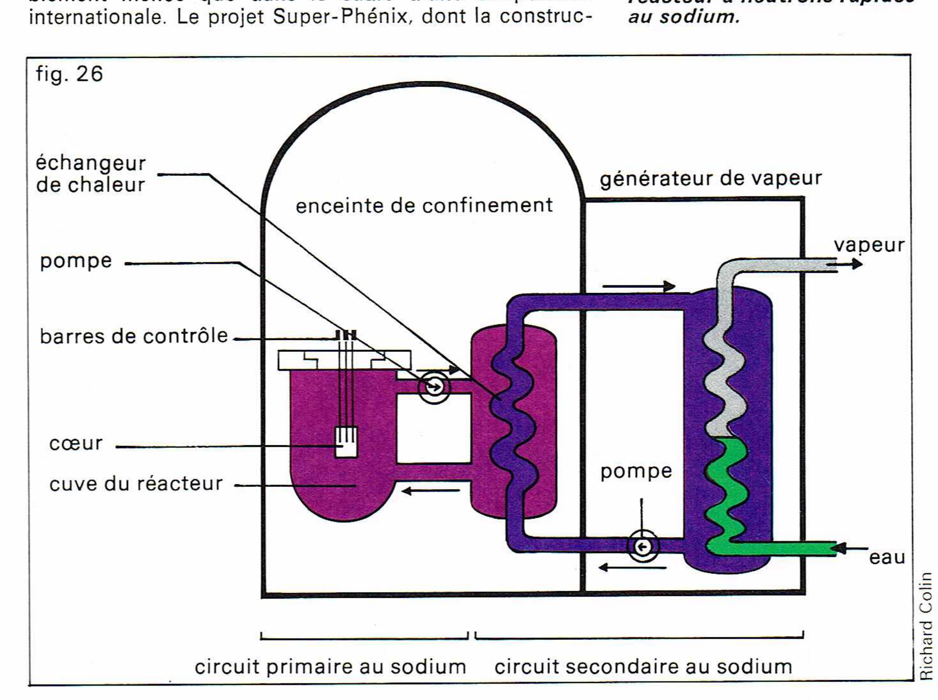
— Ils peuvent fabriquer plus de matières fissiles qu'ils n'en consomment ; on les appelle pour cela « surrégénérateurs ».

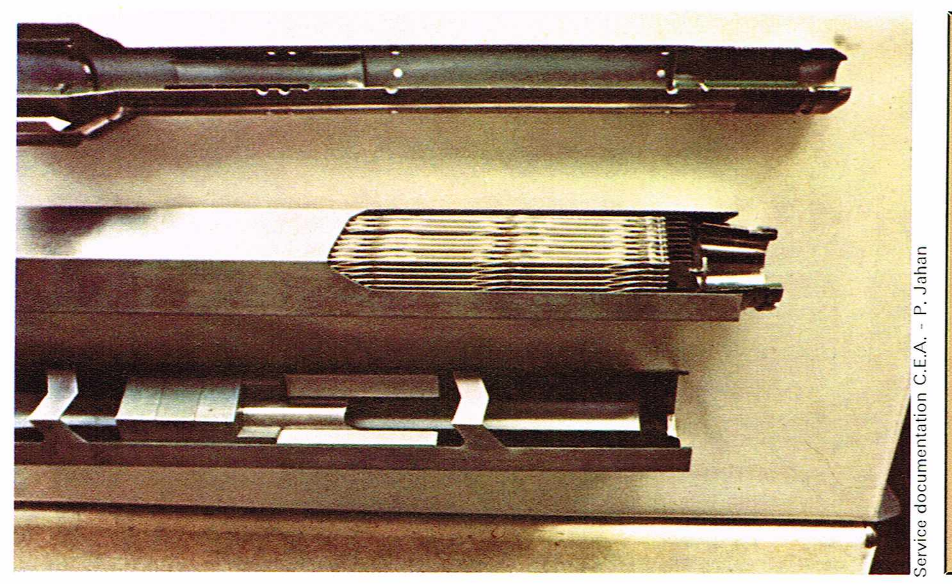
— Le sodium est utilisé comme fluide caloporteur, ce qui introduit une technologie entièrement nouvelle.

De tous ces aspects, c'est sans conteste celui de la surrégénération qui retient le plus l'attention. A la fin de la dernière guerre, le physicien Fermi qui venait de faire diverger le premier réacteur construit au monde avait prophétisé que les pays qui maîtriseraient la surrégénération disposeraient d'une indépendance énergétique totale. Pour cette raison tous les grands pays industriels ont lancé très tôt des programmes de recherche et de développement. Ces programmes se présentaient comme un parcours jalonné d'étapes : petit réacteur de recherche de faible puissance, réacteur de démonstration de puissance industrielle (2 à 300 MW), réacteur commercial de forte puissance (1 000 à 1 200 MW) compétitif économiquement avec les autres filières.

Ces programmes ont connu des bonheurs différents. Résumons la situation en disant que la première épreuve a été réussie par tous les protagonistes. Seuls trois pays, l'U. R. S. S., la France et la Grande-Bretagne, ont réussi la seconde. Les résultats se font attendre encore en Allemagne, au Japon et aux États-Unis. Quant à la troisième, il est vite apparu qu'elle ne pouvait être valablement menée que dans le cadre d'une coopération internationale. Le projet Super-Phénix, dont la construc-

▼ *Figure 26 : schéma des circuits d'un réacteur à neutrons rapides au sodium.*





Service documentation C.E.A. - P. Jahan

Fertile
Qualificatif s'appliquant à un atome susceptible d'être transformé en atome fissile par réaction nucléaire (capture d'un neutron). Exemples : uranium 238 et thorium 232.

Fissile
Qualificatif s'appliquant à un atome susceptible de subir la fission nucléaire par des neutrons lents. Exemples : uranium 233, uranium 235 et plutonium 239.

Réacteur convertisseur
Réacteur qui produit à partir d'une substance « fertile » une substance « fissile » différente de la substance fissile consommée par le réacteur. Tous les réacteurs thermiques fonctionnant à l'uranium naturel ou enrichi sont des convertisseurs qui fabriquent la matière fissile « plutonium » en consommant la matière fissile « uranium 235 ».

Réacteur régénérateur
Réacteur qui produit à partir d'une substance « fertile » une substance « fissile » identique à celle qu'il consomme.

Réacteur surrégénérateur
Réacteur régénérateur qui produit plus de matière fissile qu'il n'en consomme.

▲ *A gauche, combustible de la chaudière à neutrons rapides de Phénix à Marcoule. A droite, quelques définitions utiles pour la compréhension des chaudières à neutrons rapides.*

tion vient de démarrer en France, en coopération avec l'Italie et l'Allemagne, et qui sera suivi de la construction d'un projet de même puissance en Allemagne, s'inscrit dans ce mouvement de coopération. On a déjà dit que la mise au point d'une nouvelle filière représentait un investissement humain et financier très important qui dépassait manifestement les possibilités d'un seul État.

Disons enfin qu'on peut imaginer différents types de réacteurs pour faire de la surrégénération. Différentes solutions ont été proposées, mais elles ont été écartées pour l'instant au seul profit du réacteur rapide à sodium qui monopolise la quasi-totalité des efforts de développement en ce domaine dans le monde entier.

Description d'une chaudière « neutrons rapides » à sodium

Le cœur d'un réacteur rapide utilise donc le plutonium comme matière fissile et le sodium comme caloporteur. Le sodium chaud, ou *sodium primaire*, puisqu'il traverse le cœur du réacteur, cède sa chaleur à un autre circuit qui utilise également le sodium comme caloporteur. Ce sodium, ou *sodium secondaire*, cède enfin sa chaleur pour la transformation d'eau en vapeur dans un générateur de vapeur. Le rôle de ce circuit secondaire sera explicité plus loin.

* *Combustible*

Comme pour les réacteurs à eau, le combustible est organisé en assemblages, composés de tubes remplis de pastilles d'oxyde qui sont appelées « aiguilles », car leur diamètre est petit (5 à 7 mm). Il y a donc beaucoup d'aiguilles dans un assemblage, ce qui permet de développer une grande surface de contact entre le combustible et le caloporteur, absolument nécessaire pour évacuer la puissance.

▼ *Maquette d'une centrale à neutrons rapides au sodium.*

U.S.I.S.

Le cœur comprend deux parties :

— au centre, le cœur proprement dit, où les pastilles sont fabriquées à partir d'un mélange de plutonium et d'uranium naturel ;

— autour du cœur central, une partie appelée *couverture* qui ne comprend que de l'uranium naturel.

L'uranium naturel, présent dans le cœur et la couverture, est dénommé matériau « fertile » (par opposition à fissile), puisque son uranium ^{238}U est appelé à se transformer en plutonium. On peut aussi utiliser comme matériau fertile l'uranium appauvri, tel qu'il est rejeté par les usines d'enrichissement.

Si l'on se rappelle que cet uranium ^{238}U, qui constitue 99,3 % de l'uranium naturel, est inutilisable dans les réacteurs thermiques, puisqu'il ne subit pas la fission, on comprend pourquoi les surrégénérateurs peuvent multiplier par un facteur supérieur à 50 l'énergie contenue dans l'uranium naturel.

On se posera la question de savoir combien de temps il faut à un réacteur surrégénérateur pour fabriquer une charge de plutonium identique à la sienne et donc susceptible de permettre le démarrage d'un réacteur de même puissance. Il faut compter entre douze et quinze ans, ce qui signifie que les réacteurs rapides ne peuvent pas fournir eux-mêmes les quantités de plutonium nécessaires à la mise en route d'un programme important de réacteurs rapides. On compte pour cela sur les convertisseurs que sont les réacteurs thermiques pour fabriquer le plutonium à partir de l'uranium ^{238}U. On peut aussi, et c'est ce qui a été fait pour démarrer certains réacteurs rapides, utiliser de l'uranium enrichi, mélangé ou non avec du plutonium.

Le combustible du cœur central est très enrichi de façon à permettre le fonctionnement en *neutrons rapides*. Comme il n'est pas nécessaire de faire de la place à un modérateur, le cœur est très compact (1,2 m³ à Phénix pour 250 MW) et sa puissance spécifique est très élevée (90 % de la puissance est dégagée dans le cœur et 10 % seulement dans la couverture). On voit tout le problème que pose ici l'extraction de la chaleur. L'emploi du sodium a constitué une réponse élégante : il ne ralentit pas les neutrons, il est abondant, facile à préparer, peu coûteux et doté, comme on l'a déjà signalé, de caractéristiques thermiques remarquables qui en font un excellent caloporteur. Il permet au réacteur rapide de produire, tout en restant à la pression atmosphérique, de la vapeur surchauffée à 560 °C tout comme les chaudières classiques. Le cœur d'un réacteur rapide contient donc de grosses quantités de plutonium : la charge de Super-Phénix serait composée de 32 t d'oxyde mixte uranium naturel-plutonium, enrichi à 15 % environ,

ce qui représenterait 4 t de plutonium. De telles quantités de matériau fissile, et de plus toxique, posent inévitablement des problèmes de sûreté qui seront évoqués plus loin.

* *Caloporteur*

L'utilisation du sodium a nécessité la création d'une nouvelle technologie. En effet tous les appareils habituels tels que pompes, robinets, filtres, tuyauteries, réservoirs, etc., qui fonctionnent convenablement avec les fluides courants, sont totalement inadaptés quand on les utilise en sodium.

La conception même des circuits et des appareils a dû être entièrement revue. Des systèmes de préchauffage ont été prévus pour éviter le gel du sodium (solidification à 98°) en dehors des périodes de marche. Les capacités comportant des niveaux libres sont remplies de gaz neutre (argon) pour éviter l'oxydation du sodium au contact de l'oxygène de l'air. Des filtres qu'on appelle « pièges froids », car ils sont fondés sur la décroissance de la solubilité des oxydes dans le sodium avec la température, maintiennent ce dernier dans un état de propreté permanente.

Ainsi maîtrisé, le sodium, corps stable et non corrosif, est d'exploitation facile, de l'avis même de tous les exploitants de circuits de sodium.

* *Cuve*

Le circuit primaire peut être conçu de deux façons différentes : soit une cuve raccordée à des échangeurs (c'est la chaudière type « circuit »), soit une cuve renfermant les échangeurs (c'est le type « intégré »). Cette dernière conception, qui est celle en France de Phénix et de Super-Phénix, semble avoir actuellement la faveur des constructeurs.

Avec ses échangeurs et les pompes associées, la cuve a des dimensions imposantes : diamètre 21 m, hauteur 19,5 m pour Super-Phénix. Elle est réalisée en acier inoxydable et construite, étant donné ses dimensions, directement sur le site.

* *Circuit secondaire*

Les générateurs de vapeur utilisant le sodium comme fluide chauffant ne sont pas simples à réaliser, car ils mettent en contact un sodium sous pression avec le mélange eau-vapeur à très forte pression (200 bars). En cas de rupture du tube, il est nécessaire de limiter les conséquences de l'irruption brutale de la vapeur dans le sodium.

Ce risque d'accident a eu comme première conséquence la mise en place d'un circuit intermédiaire pour découpler les générateurs de vapeur du réacteur. Le rôle de ce circuit est donc simplement de prélever la chaleur du réacteur par des échangeurs dits « intermédiaires » pour la transmettre aux générateurs de vapeur. Ce circuit utilise le sodium également comme caloporteur, ce qui simplifie la conception de l'échangeur intermédiaire : sodium sans pression des deux côtés. Une fuite sur cet échangeur qui met en contact deux circuits de sodium n'aura donc que des conséquences limitées.

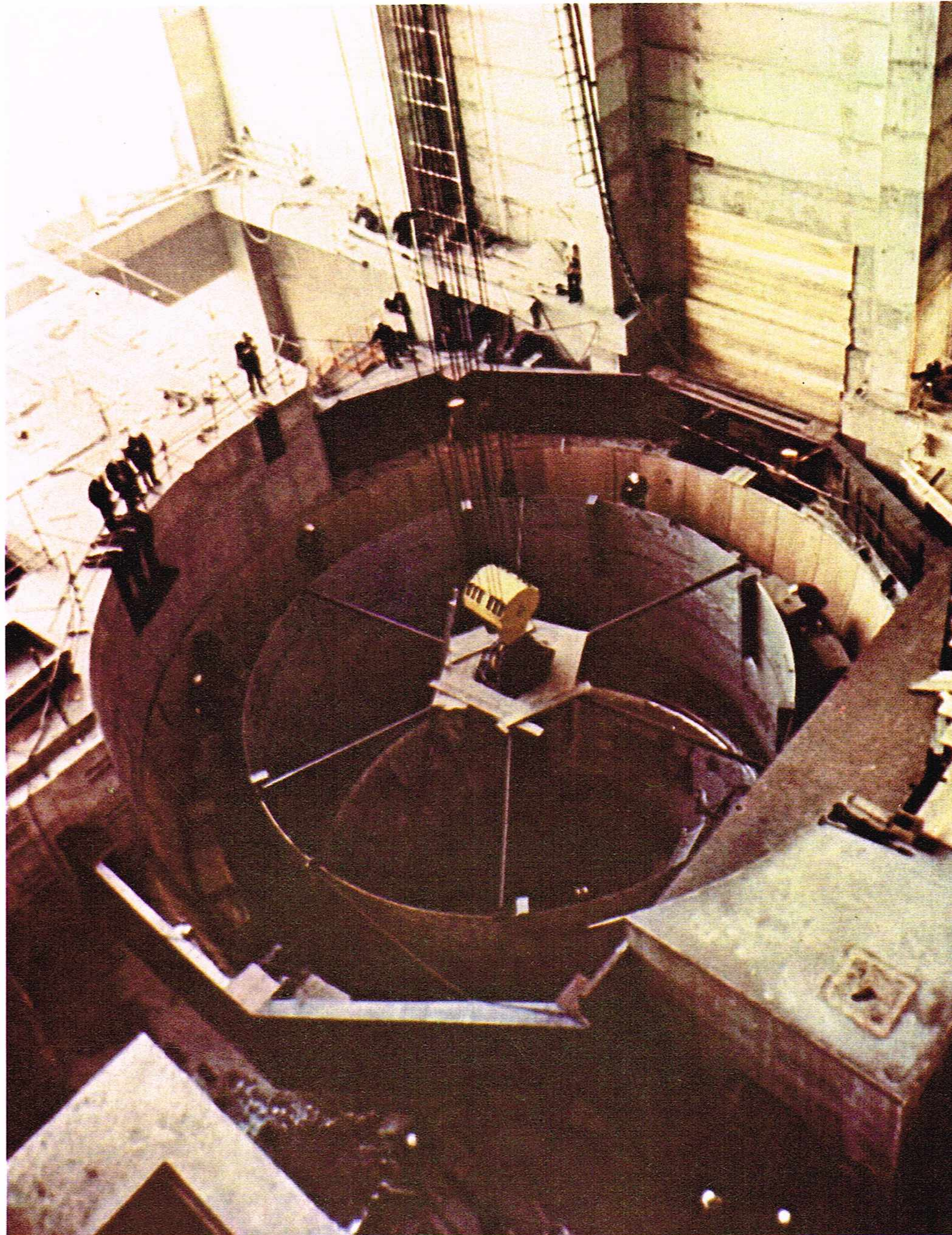
De plus, le risque de rupture de tube dans un générateur de vapeur a orienté la conception même de cet appareil. Des détecteurs (qui cherchent l'hydrogène de l'eau) constatent en permanence l'intégrité de la surface d'échange. En cas d'incident, l'échangeur est aussitôt isolé et les produits de la réaction sodium-eau sont évacués par des membranes d'éclatement vers un réservoir de stockage.

Les générateurs de vapeur sont généralement de type tubulaire, à passage unique. Ils comportent une section vaporisateur, une section surchauffeur et éventuellement une section resurchauffeur. Ils délivrent pour la production d'électricité une vapeur dont les conditions de pression et de température sont identiques à celles des chaudières classiques. On dispose donc du même rendement thermodynamique élevé 42 % (contre 32 % seulement pour les réacteurs à eau légère), et il est possible pour la production d'électricité d'utiliser le matériel standard éprouvé sur les installations classiques (turbo-alternateur de 250 MW à Phénix, deux turbo-alternateurs de 600 MW à Super-Phénix).

Développement et avenir des chaudières « rapides »

Tous les problèmes posés par l'accumulation de matières fissiles dans le cœur du réacteur et par la réfrigération par métal liquide situent cette filière à un niveau technologique différent de celui des autres réacteurs. Il n'y a plus, comme c'est le cas pour les composants (capacités sous pression et circuits) des réacteurs à eau, prolongation d'une technologie existante, mais rupture.

Cette situation est fréquente dans l'histoire technologique des machines : à une période donnée, un appareil de technologie souvent achevée se voit remplacé par un autre, de principe différent et mettant généralement en jeu une technologie nouvelle. Ainsi en est-il aujourd'hui des grandes chaudières classiques qui cèdent progressivement la place, sous l'effet implacable du renchérissement des combustibles fossiles, aux chaudières nucléaires à réacteurs thermiques. Ces nouvelles chaudières, qui se contentent de brûler une partie des 0,7 % d'uranium 235 contenu dans l'uranium naturel, seront-elles remplacées à leur tour par les chaudières à neutrons rapides ? Les implications à la fois technologiques, industrielles, politiques et psychologiques de ce problème font qu'il n'est pas possible aujourd'hui d'apporter une réponse tranchée à cette question. Remarquons simplement que les chaudières « neutrons rapides à sodium » arriveraient à point dans la décennie 1980-1990 (stocks importants de plutonium, coût croissant de l'uranium). Elles n'ont pas bénéficié au départ, comme les chaudières à eau légère, de la priorité et des investissements habituellement



Service documentation C.E.A. - P. Jahan

▲ ***Construction des différentes enceintes de la cuve du réacteur Phénix : dans ce type de chaudière, dit type intégré, la cuve renferme aussi les échangeurs de chaleur, ce qui lui donne des dimensions impressionnantes.***



Paolo Koch - Rapho

▲ *Vue extérieure de la centrale à eau lourde de Pickering (Canada). Actuellement le développement de ce type de filière se poursuit uniquement au Canada.*

réservés aux fabrications militaires. Il leur faut donc, étant soumises aux lois de la concurrence, démontrer qu'elles sont aussi sûres et aussi économiques que les autres types de chaudières. C'est dans cette perspective que se déroulent les programmes de développement en cours dans le monde.

Autres types de réacteurs

Pourquoi développer de nouveaux types de réacteurs alors que la filière à eau légère s'est déjà imposée techniquement, financièrement et industriellement, que cette filière paraît encore perfectible et qu'enfin on semble tenir avec les surrégénérateurs un type de réacteur capable de prendre la suite des réacteurs à eau légère en « brûlant » la plus grande partie de leurs déchets, à savoir le plutonium et l'uranium appauvri ?

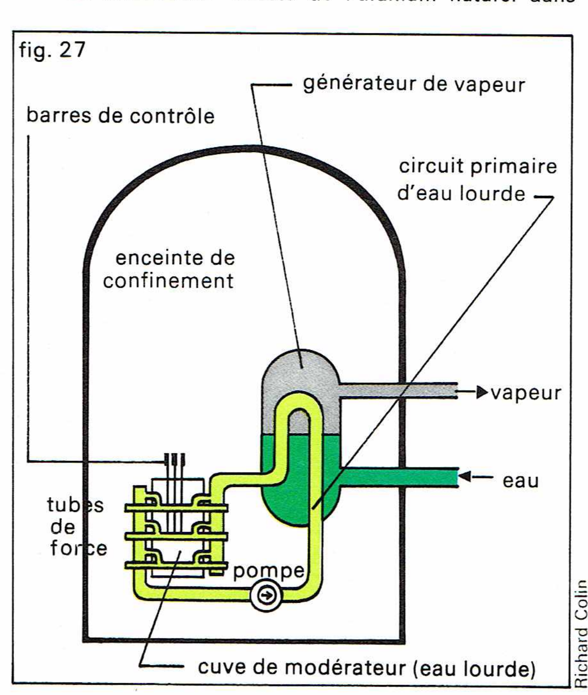
Plusieurs objectifs justifient de nouveaux développements.

— La combustion *directe* de l'uranium naturel dans des conditions économiques satisfaisantes. Les réacteurs à eau légère font en effet appel à l'uranium enrichi dont la production dépasse les possibilités industrielles de nombreux pays ; ceux-ci deviennent donc, s'ils adoptent cette filière, dépendants des pays détenteurs des usines d'enrichissement.

— La recherche d'une meilleure utilisation des matières fertiles, en particulier le thorium.

— L'ouverture des applications de l'énergie nucléaire, actuellement limitées à la production d'électricité, à la fourniture de chaleur.

C'est dans ces perspectives que se placent les efforts actuellement déployés dans les filières « eau lourde » et « haute température » (HTR).



▶ *Figure 27 : schéma d'un réacteur à eau lourde PWR (à tubes de force).*

Chaudières à « eau lourde »

Les réacteurs de cette filière sont fondés sur l'emploi de l'eau lourde (D_2O) comme modérateur. On a vu que l'eau lourde est le meilleur des modérateurs ; elle permet l'emploi de l'uranium naturel sous sa forme « oxyde ». Celui-ci est brûlé presque complètement, et il n'y a donc pas besoin de retraitement si on ne cherche pas à récupérer le plutonium. On évite donc avec ces réacteurs, non seulement l'usine d'enrichissement, mais aussi l'usine de retraitement des combustibles (*fig.* 27).

La réfrigération peut se faire avec de l'eau lourde ou de l'eau légère, un liquide organique ou un gaz (CO_2 par exemple, comme dans le prototype français EL4).

Le développement de cette filière se poursuit uniquement au Canada : variante *CANDU* (Canada Deuterium Uranium). Le cœur est refroidi par de l'eau lourde sous pression, mais contrairement aux réacteurs PWR « eau légère », le *fluide modérateur* n'est pas mélangé avec le *fluide réfrigérant*, bien qu'ils soient tous les deux constitués par de l'eau lourde. Pour éviter les problèmes liés à la réalisation et à l'exploitation de grandes cuves en acier au carbone revêtu intérieurement d'acier inoxydable comme sur les PWR, le réfrigérant circule dans des tubes sous pression ou tubes de forces. Il y en a 390 de 10 cm de diamètre traversant une cuve de 8 m de long sur 7 m de diamètre. La simplicité gagnée par la suppression de la cuve se paye par toutes les étanchéités qu'il faut prévoir aux extrémités des tubes de forces.

Le programme canadien prévoit la réalisation de 8 000 MW ; 4 tranches de 540 MW sont déjà en service à Pickering.

Ces réacteurs permettent de « brûler » l'uranium naturel. Ils sont susceptibles de fonctionner avec un cycle utilisant le thorium. Les Canadiens sont très confiants dans l'avenir de leur filière.

Réacteurs « haute température » (HTR)

On ne peut plus parler ici de chaudière au sens habituel du mot, car ces réacteurs ont pour premier objectif d'atteindre des températures élevées dans la plage de 800 à 1 100 °C. A ces températures, il n'est plus question d'utiliser la vapeur d'eau comme agent de transmission de la chaleur et tous les projets en cours utilisent le gaz comme réfrigérant, en général l'hélium qui est inerte chimiquement à haute température (*fig.* 28).

Ces hautes températures devraient ouvrir à l'énergie nucléaire des débouchés intéressants dans les domaines suivants : sidérurgie, gazéification du charbon, électrolyse de l'eau, fabrication de combustibles de synthèse, etc. Ces réacteurs pourraient également être électrogènes par couplage en cycle direct avec une turbine à gaz.

Le cœur de ces réacteurs utilise le graphite comme modérateur. L'élément combustible se présente sous la forme de particules de diamètre 1 mm environ, constituées par un noyau de combustible fissile et fertile, enrobées de graphite. Ces particules sont dispersées dans des éléments de graphite en forme de boulets de 6 cm de diamètre ou de prismes hexagonaux.

Si l'élément prismatique est utilisé, le réacteur prend la forme d'un empilement, percé par les canaux de refroidissement. Dans le cas où le combustible se présente sous la forme de boulets, le réacteur ressemble à nos anciens poêles à charbon. La cuve est chargée de boulets par le haut ; le gaz de refroidissement circule dans les interstices et les boulets, après « combustion » nucléaire, sont déchargés à la partie inférieure. Il est intéressant de noter cette ressemblance entre le poêle à charbon et le réacteur à boulets.

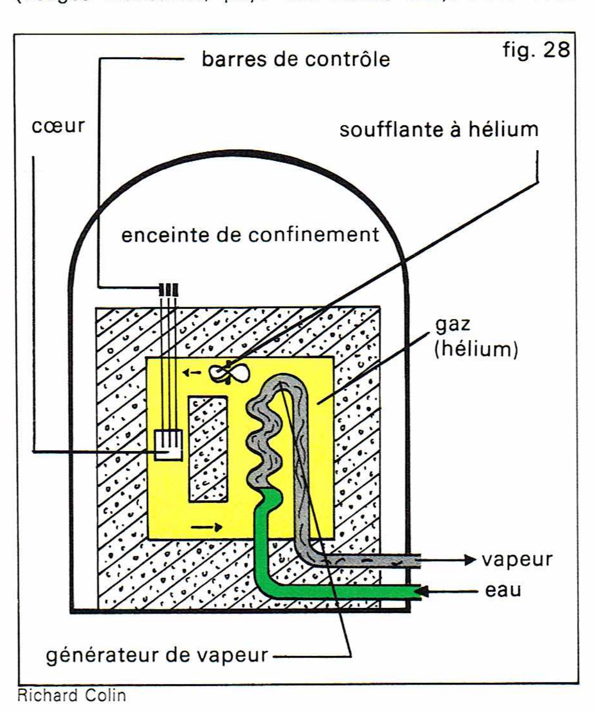
Service documentation C.E.A. - P. Jahan

▲ ***Détail de la fabrication des pastilles d'oxyde d'uranium pour la centrale Phénix ; ces pastilles sont ensuite enfilées dans des tubes appelés aiguilles.***

Une autre caractéristique de cette filière est l'utilisation du cycle thorium, puisque tous les réacteurs construits ou envisagés ont un combustible comportant du thorium. Le fonctionnement des installations en service est satisfaisant, mais le retraitement des combustibles au thorium reste à mettre au point.

Fourniture de chaleur à basse température

De nombreuses études ont été menées pour utiliser les chaudières nucléaires actuelles pour la fourniture de chaleur à basse température pour des usages domestiques ou industriels. Le problème ainsi posé conduit donc à des installations mixtes de production d'électricité et de chaleur. La vapeur est prélevée à l'amont de la turbine, sur un étage de celle-ci ou à son échappement (turbine à contre-pression). La rentabilité d'une telle installation est difficile à obtenir, sauf si la production d'électricité et de chaleur peut être maintenue tout au long de l'année (usages industriels, pays très froids, etc.). Pour cette raison, le nombre des réalisations est resté jusqu'à ce jour limité. On pense aujourd'hui que ce besoin de chaleur à basse température, pour des applications comme le chauffage urbain par exemple, serait beaucoup mieux satisfait par des réacteurs conçus spécialement pour cet usage. Ces réacteurs pourraient par exemple être des réacteurs à eau légère de faible puissance, de type « piscine » comme les réacteurs de recherche. Ces réacteurs sous pression présentent peu de risques et il serait facile d'admettre leur construction à proximité des agglomérations, comme c'est le cas pour les réacteurs de recherche. Ces questions sont pour le moment à l'étude.



Richard Colin

◀ ***Figure 28 : schéma d'un réacteur à haute température.***

Problèmes spécifiques à l'énergie nucléaire

Toute combustion d'un combustible *fossile* produit de la chaleur et des déchets. La « combustion nucléaire » n'échappe pas à cette règle, et, tout au long de son fonctionnement, le cœur d'un réacteur, qui est le siège des réactions nucléaires, accumule des produits radio-actifs. A côté des produits de fission qui prennent naissance dans le combustible et qui constituent la plus grande partie des déchets, on trouve des produits « d'activation » dans tous les matériaux qui se trouvent en permanence ou circulent dans le cœur, à savoir : les structures, le modérateur et le réfrigérant. Tous ces produits ne sont pas des déchets. Les matières fissiles (^{235}U résiduel et plutonium) sont réutilisables ; certains produits de fission sont recherchés pour des applications scientifiques, médicales ou industrielles. Mis à part ces cas particuliers, on ne sait que faire pour l'instant des corps radio-actifs produits au cours de la marche des réacteurs.

Le caractère « radio-actif » de ces résidus de la combustion nucléaire inspire de la crainte. Le rayonnement ne se voit pas, ne se sent pas (il en était de même avec l'électricité à ses débuts). Ses effets biologiques sont retardés et restent liés dans nos esprits aux effets des explosions nucléaires. On comprend donc facilement que tous les problèmes relatifs aux déchets radio-actifs soient à la fois très étudiés et très controversés. Il n'est pas du propos de cet ouvrage d'alimenter la controverse mais de présenter les principes et les réalisations actuellement retenus pour le confinement de la radio-activité engendrée par les réacteurs ; d'abord dans les réacteurs eux-mêmes pendant leur fonctionnement, ensuite à l'extérieur après déchargement du combustible usé.

Confinement de la radio-activité des réacteurs

La sûreté d'un réacteur repose tout d'abord sur son comportement physique dans les conditions de marche



Photothèque E.D.F. - Sodel - Berenger

▲ *La sûreté d'un réacteur repose sur son comportement physique dans les conditions normales ou accidentelles qu'il est susceptible de rencontrer : ici, circuit d'aspersion sous le dôme du réacteur de Bugey 2.*

normales ou accidentelles qu'il est susceptible de rencontrer. C'est donc pendant toute sa conception que l'on s'efforce de donner à un type de réacteur toutes les qualités qui le rendront « intrinsèquement » sûr.

D'autre part, on entoure le combustible, où vont se localiser les produits de fission, d'enceintes successives, à la manière des « poupées russes », pour confiner la radio-activité : c'est *le principe des barrières multiples* (*fig.* 29).

- La première barrière est toujours constituée par le gainage du combustible.
- La seconde barrière comprend la cuve et le circuit primaire qui lui est éventuellement associé.
- La troisième barrière prend généralement la forme d'une enceinte étanche et résistante qui renferme le circuit primaire.
- Une quatrième barrière est quelquefois prévue sous la forme d'une deuxième enceinte, seulement étanche, qui entoure la première.

Suivant les filières, c'est-à-dire suivant les types de réacteurs, ces différentes barrières prennent des formes assez différentes mais respectent toujours ce principe des barrières successives entre les produits radio-actifs et l'environnement.

Ces barrières successives sont indépendantes. La rupture de l'une d'entre elles ne doit pas entraîner la défaillance des autres. Leur étanchéité est surveillée en fonctionnement de façon aussi continue que possible. En cas de doute, le réacteur est arrêté et mis en état de sécurité. La réalisation de ces différentes barrières est faite avec le plus grand soin et leur intégrité doit être démontrée par une organisation particulière (programmes d'assurance qualité).

Malgré tout le soin pour les construire, ces barrières ne sont pas totalement étanches (l'étanchéité absolue n'est pas concevable : certains gaz de fission traversent le métal du gainage sans qu'il y ait pour autant de défaut décelable dans ce dernier). Il est donc prévu des systèmes de récupération des fuites (appelées ensuite « effluents ») qui fonctionnent en permanence et envoient le produit de leur collecte vers une station de traitement. Les effluents radio-actifs y sont triés : les plus nocifs sont mis à part et conditionnés avant d'être envoyés vers un centre de stockage ; les effluents qui ne présentent pas de danger sont rejetés s'ils sont gazeux à l'atmosphère par la cheminée de l'air de ventilation et s'ils sont liquides dans le rejet d'eau des condenseurs.

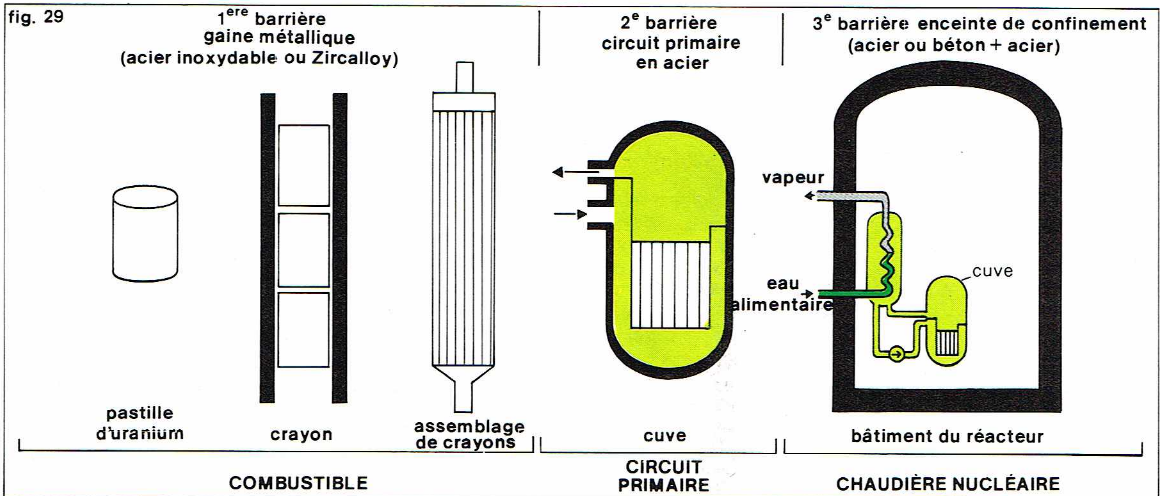
Ces rejets, qui s'effectuent selon des normes internationales, ne représentent pas de dangers objectifs pour l'environnement. Ils présentent cependant deux inconvénients : le premier est psychologique. Même faible, un rejet est toujours mal accueilli et on s'efforce donc actuellement de rendre les centrales parfaitement « propres ». De plus, la nécessité de diluer les effluents liquides rend la centrale tributaire d'un gros débit d'eau et on utilise habituellement celui qui a été prévu pour la réfrigération des condenseurs. La suppression de cette nécessité de diluer les effluents affranchirait les centrales de la réfrigération par eau et leur ouvrirait de nouvelles perspectives d'implantation dans des sites isolés, mais inutilisables aujourd'hui du fait de leur manque de capacité de réfrigération (zones désertiques par exemple) ; c'est pour cette raison que l'on fonde beaucoup d'espoir actuellement sur la technique de réfrigération sèche (directement à l'air).

Stockage des déchets radio-actifs

La radio-activité est un phénomène physique sur lequel les techniques n'ont pas de prise, et de ce fait, sauf réutilisation dans certains cas particuliers, les déchets radio-actifs ne peuvent être que stockés dans des conditions parfaites de sûreté.

Il existe de nombreuses variétés de déchets radio-actifs qui posent de façon différente le problème du stockage. Les caractéristiques à considérer sont :

— le volume ;
— l'activité, qui s'exprime en curies (Ci) ;
— la période radio-active ou demi-vie, qui est le temps moyen nécessaire pour que l'activité diminue jusqu'à la moitié de sa valeur (cette période s'exprime en secondes, jours ou années suivant les corps radio-actifs considérés) ;
— la radio-activité, qui est liée aux rayonnements émis par un élément radio-actif fixé par un organisme vivant. Elle est liée d'une part à la nature de ce rayonnement (α, β et γ) et d'autre part au métabolisme de l'élément considéré dans l'organisme qui l'a fixé.



Richard Colin

▶ *Figure 29 : schéma du principe des barrières multiples ; la radio-activité du combustible est confinée grâce à des enceintes successives, indépendantes les unes des autres.*



Bruno Barbey - Magnum

◀ *Les rejets d'éléments radio-actifs, qui s'effectuent selon des normes internationales, ne présentent pas de dangers objectifs pour l'environnement; cependant ils sont mal accueillis par l'opinion et l'on s'efforce actuellement de rendre les centrales nucléaires parfaitement « propres »; ici, une vue extérieure de la centrale de Saint-Laurent-des-Eaux.*

▼ *Les déchets radio-actifs autres que les combustibles (boues, filtres d'épuration, etc.) sont compactés puis entourés de béton et entreposés dans des silos comme celui de Simiane-la-Rotonde (Basses-Alpes).*

Compte tenu de ces données, on considère habituellement, pour ce qui concerne leur stockage, trois familles de déchets.

— Les déchets de faible radio-activité (de l'ordre du Ci/m^3) ne contenant pas, de plus, des éléments radio-actifs à longue période. Les effluents des réacteurs de puissance actuels appartiennent à cette catégorie : les volumes produits sont importants et la radio-activité faible.

— Les déchets de faible ou moyenne radio-activité (de l'ordre du Ci/dm^3) contenant des éléments radio-actifs à longue période. Ces déchets sont produits par les usines de retraitement des combustibles irradiés et de fabrication des combustibles au plutonium. Les quantités sont peu importantes.

— Les déchets de forte activité (de l'ordre du Ci/cm^3). Cette famille est essentiellement constituée par les produits de fission produits par les réacteurs. Ils sont séparés dans les usines de retraitement des combustibles irradiés. Comme on l'a déjà noté, on retrouve dans ces déchets la quasi-totalité de la radio-activité produite par les réacteurs de puissance (99,9 %). Le volume de ces déchets est très faible.

* *Principe du stockage*

Les conditions retenues actuellement pour le stockage peuvent se résumer ainsi :

— garantie totale du confinement. Il faut éviter le retour de la radio-activité vers l'environnement pendant la période dangereuse. Le principe utilisé est, comme sur les réacteurs, celui des « barrières multiples »;

— surveillance et contrôles aussi réduits que possible;

— neutralisation d'espace aussi réduite que possible;

— pas d'hypothèque sur l'exploitation future de ressources naturelles.

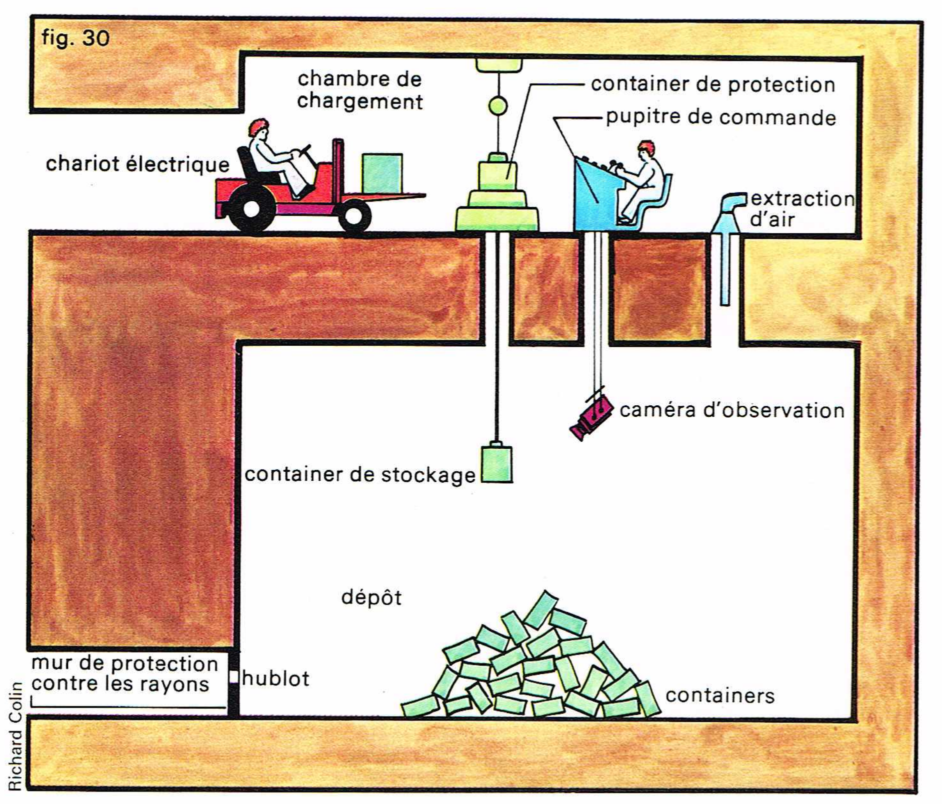
On notera que ces trois derniers points sont dictés par le souci de ne pas léguer de contraintes à nos descendants.

* *Réalisations actuelles*

Les déchets correspondant aux deux premières familles (faible et moyenne activité) représentent un volume important. Un réacteur à eau légère de 1 000 MW produit en moyenne 250 m^3 par an de déchets de faible activité. Le volume cumulé en Europe à la fin du siècle, compte tenu du développement actuel de l'énergie nucléaire, peut être évalué à 1 000 000 m^3. Ce chiffre est considérable, mais il faut le comparer à d'autres rejets industriels. Une centrale thermique rejette par sa cheminée plus de 2 000 t de poussières par an. L'ensemble des poussières relâchées dans l'atmosphère pour une seule



Martine Franck - Viva



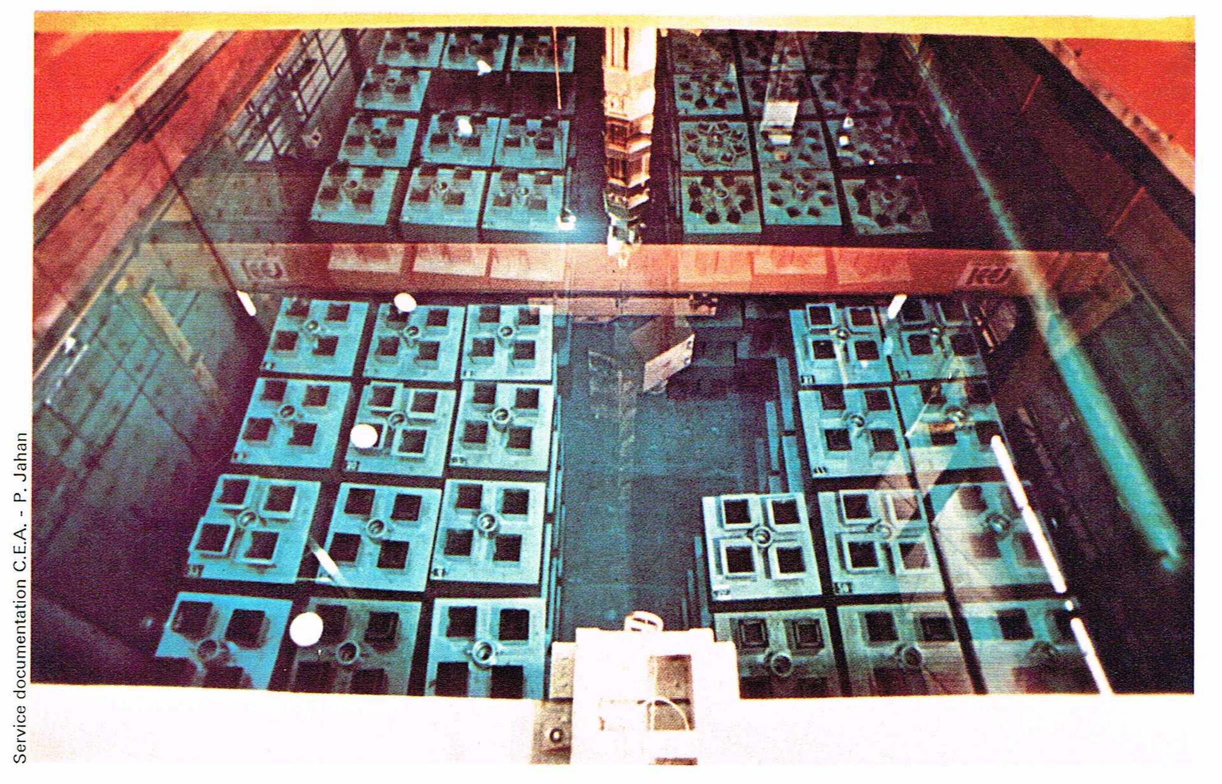
▲ *Figure 30 : stockage souterrain de déchets radio-actifs.*

année par l'ensemble des foyers domestiques et industriels pour un pays comme la France dépasse le million de tonnes. Dans le cas de l'industrie chimique, certains déchets ont des nuisances potentielles très grandes sans qu'il existe un processus de disparition naturelle comme dans le cas de la radio-activité.

Pour ces déchets d'activité peu élevée et de volume important, les solutions utilisées sont l'immersion dans des fosses océaniques ou le stockage terrestre en surface ou à faible profondeur (*fig.* 30). Les règles des conditions de l'immersion ont été fixées par des règlements internationaux et, compte tenu des très grandes marges de sécurité prises, ces opérations peuvent être considérées comme ne présentant aucun danger. Les déchets sont enfermés dans des containers très résistants et présentant une double barrière d'étanchéité dont le but n'est pas de réaliser un confinement absolu. On demande à ce container une résistance suffisamment grande pour que la dispersion de la radio-activité se fasse sur de longues périodes de temps, ce qui permet, compte tenu des masses d'eau intéressées, d'atteindre après dilution un niveau d'activité très inférieur à ceux de la radio-activité naturelle de l'eau de mer, qui est notable, comme on le sait. La gêne que pourrait représenter la présence des containers au fond du fossé océanique lors d'une exploitation future des fonds de l'Océan, d'une part, le coût des opérations d'immersion, d'autre part, ont incité de nombreux pays à renoncer à l'immersion des déchets radio-actifs de faible activité. Ces pays, et c'est le cas de la France, utilisent donc le stockage terrestre qui ne soulève aucune difficulté technique. Il s'agit en effet de stocker ces déchets après conditionnement (enrobage dans du bitume, du béton ou des résines, suivi de mise en fût métallique ou en béton) dans des ouvrages en béton, généralement pour des périodes de l'ordre de 1 000 ans. C'est une durée très longue comparée à la vie humaine, mais inférieure à la durée de certaines constructions humaines qui ont résisté aux intempéries, sans aucun entretien, pendant plusieurs dizaines de siècles. Ces deux procédés, immersion et stockage terrestre, sont appelés à coexister à l'avenir, étant donné leurs avantages respectifs.

Les déchets de haute activité d'éléments de période radio-active longue posent des problèmes de stockage beaucoup plus difficiles. Jusqu'à présent, compte tenu des volumes très faibles mis en jeu, on s'est contenté de stocker provisoirement ces déchets après conditionnement (un des procédés, très employé, est celui de la vitrification) dans des puits en acier aménagés dans du béton.

Une solution définitive de stockage envisageable à court terme est de placer ces déchets dans des formations géologiques stables. On sait en effet que des formations ont mis des centaines de millions d'années à se former, et certaines sont stables depuis des dizaines de millions d'années. On peut donc penser que cette stabilité se maintiendra pendant des durées de quelques centaines de milliers d'années. Dans des formations géologiques sans circulation d'eau, ou de nature absorbante, les risques de migrations des produits radio-actifs sont nuls. On s'oriente donc vers des stockages de ce type qui, compte tenu du développement actuel de l'énergie nucléaire, devraient être opérationnels vers 1990. Ces stockages seront ouverts sur une base réversible, de façon à pouvoir revenir



Service documentation C.E.A. - P. Jahan

▶ *Après leur renouvellement, les éléments combustibles, fortement radio-actifs, séjournent trois mois dans la piscine du réacteur, puis ils sont transportés à l'usine de traitement de La Hague ; découpés et après un autre séjour en piscine, ils subissent divers traitements chimiques permettant l'obtention de déchets liquides.*

en arrière après plusieurs dizaines d'années si on s'apercevait que les hypothèses initiales ne se révélaient pas tout à fait exactes.

D'autres solutions sont envisageables. Citons tout d'abord le stockage dans le fond des océans. Il ne s'agit pas ici d'immersion mais d'un stockage dans des puits forés dans le fond marin. Ces stockages seraient prévus dans des zones de faible sismicité, à sédimentation rapide pour ajouter une barrière de confinement supplémentaire.

On a songé aussi à des méthodes d'élimination plus définitive. Pour certains éléments, on peut les transformer, par transmutation dans un réacteur, en un autre élément de moindre activité. Le recyclage du plutonium appartient à cette méthode qui peut s'étendre à tous les éléments lourds transuraniens. On a parlé également d'évacuation spatiale vers le Soleil. Le coût de ces opérations (séparation des transuraniens en vue de leur transmutation, évacuation spatiale) est trop élevé aujourd'hui pour qu'elles soient envisageables à court terme, d'autant plus que la solution de stockage en formation géologique stable paraît réalisable en toute sécurité.

En conclusion, les problèmes de stockage des déchets très radio-actifs à vie longue peuvent se résumer ainsi :
— la nécessité de stocker apparaîtra de façon significative dans 10 ans (entre 1985 et 1990) ;
— il existe une solution qui est le stockage en formation géologique stable des déchets au préalable conditionnés ;
— d'autres solutions, en particulier stockage dans les fonds marins, sont envisageables.

On peut donc constater que, si les spécialistes prétendent pouvoir mettre en œuvre des solutions satisfaisantes, ils ne peuvent s'appuyer sur une expérience de plusieurs dizaines ou centaines d'années. La garantie ne peut donc se fonder que sur leurs connaissances techniques et leurs calculs. C'est toujours de cette manière qu'a progressé la technologie, en prenant bien souvent des risques. Cette notion de risque a beaucoup évolué : mal apprécié mais couvert par des coefficients de sécurité par les ingénieurs de jadis, le risque est devenu aujourd'hui partie intégrante des projets. On le reconnaît comme un paramètre mathématique et il perd de ce fait son caractère subjectif de « coup du sort ». Par des calculs de probabilités, il est possible de le maintenir à un niveau suffisamment bas pour qu'il devienne acceptable.

Le public réagit sur d'autres critères où la passion se mêle à la raison. Y a-t-il un point de contact entre la notion de risque probabiliste et l'opinion publique des pays industrialisés? Tel est l'enjeu de la controverse actuelle sur le problème du stockage des déchets radio-actifs et plus généralement sur celui du développement de l'énergie nucléaire.

Autres types de chaudières

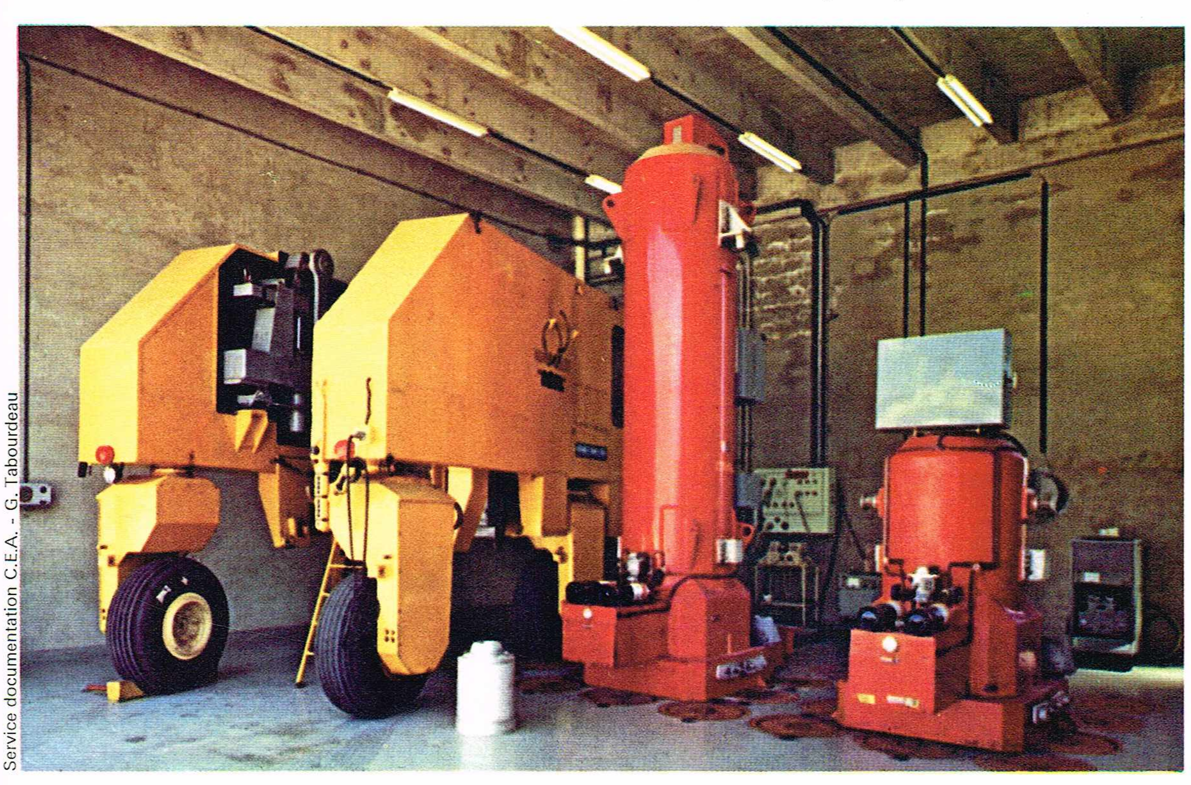
Dans les paragraphes précédents ont été décrites les chaudières classiques qui assurent la conversion de l'énergie chimique en énergie thermique et les chaudières nucléaires qui font cette conversion à partir de l'énergie nucléaire. Les chaudières classiques ont assuré pendant longtemps les besoins thermiques sous forme vapeur. Depuis une vingtaine d'années, les chaudières nucléaires les remplacent progressivement dans les installations de grande puissance destinées à la production d'énergie électrique. On sait que cette évolution se fait sous la pression des coûts croissants des combustibles fossiles qui favorise la production de thermies nucléaires à partir d'un certain niveau de puissance.

Les besoins de vapeur de puissance réduits, tels qu'on les rencontre dans la plupart des industries, sont satisfaits par des chaudières classiques. Les quelques tentatives d'insertion d'une chaudière nucléaire dans un processus industriel n'ont jusqu'à présent jamais abouti. Dans l'état actuel de la technologie nucléaire, les chaudières utilisant la fission nucléaire ne sont pas en effet adaptées à cette mission. A côté des chaudières classiques se développent depuis une vingtaine d'années des chaudières électriques. Ces chaudières devraient connaître un large développement dans la mesure où l'utilisation de l'électricité nucléaire comme énergie primaire va s'accentuer dans tous les pays industrialisés.

Il reste un dernier type de conversion dont on n'a pas encore parlé : la conversion d'énergie radiante en énergie thermique. C'est sur ce principe que fonctionneront les futures chaudières solaires actuellement à l'étude dans divers pays. Il est difficile de leur prédire aujourd'hui un avenir. Comme toute nouvelle technologie, elles auront à s'imposer techniquement et économiquement. Peut-être chaudières de demain, elles clôtureront ce chapitre sur les conversions aboutissant à l'énergie thermique.

Chaudières électriques

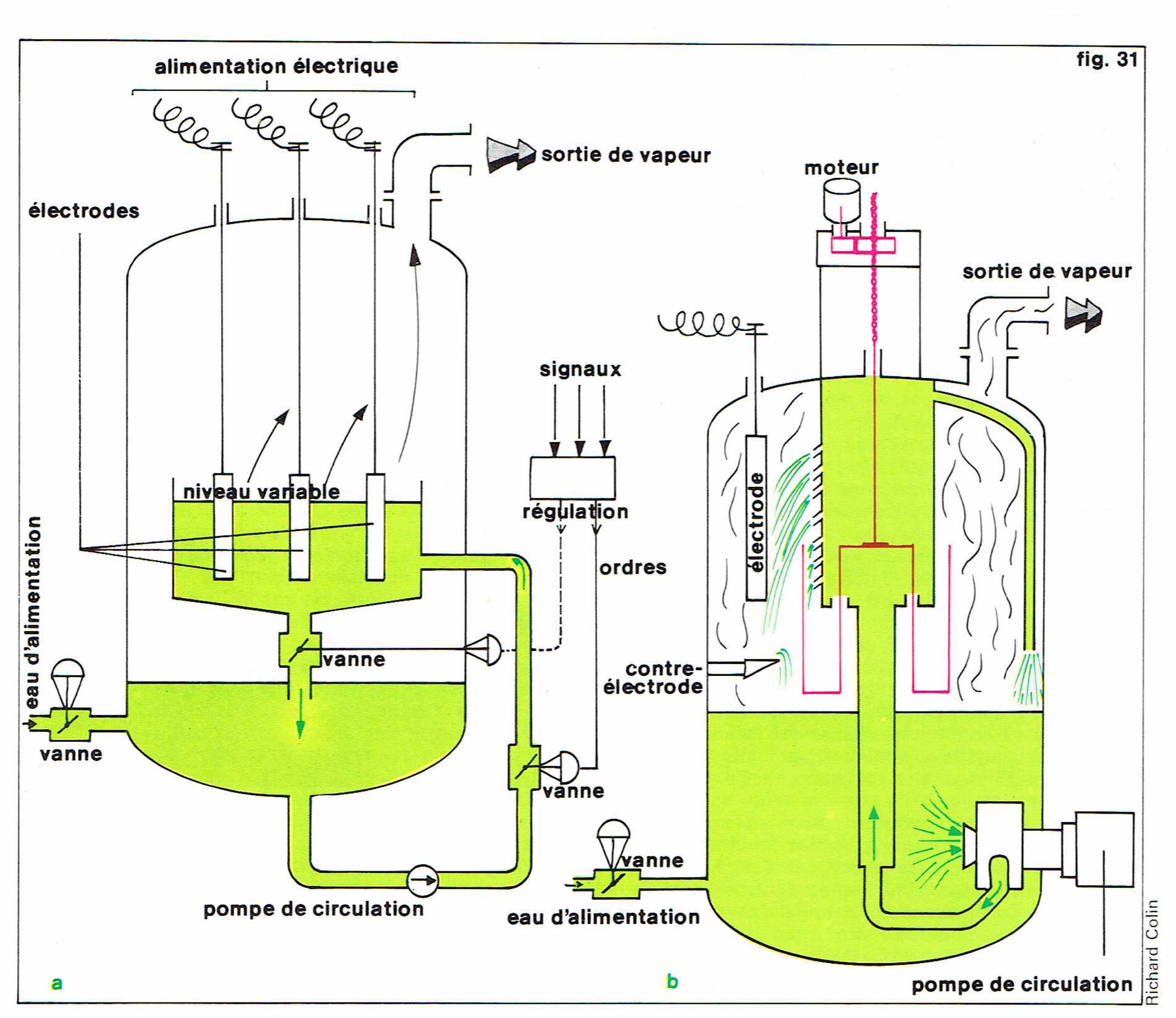
Ces chaudières transforment l'énergie électrique en chaleur. Leur rendement est excellent (98 %) et leur emploi est justifié économiquement si on dispose d'énergie électrique primaire. Il est à noter que ce type d'équipement s'est développé dans des pays comme la Suède et la Suisse dont la production d'énergie repose en grande partie sur l'hydraulique et le nucléaire.



Service documentation C.E.A. - G. Tabourdeau

◀ *Une fois liquéfiés, les déchets sont enrobés par différents procédés (béton, bitume, vitrification). Ici, une machine permettant le transport des blocs de verre à Marcoule.*

▶ *Figure 31 ; principe des chaudières électriques :*
a) *réglage par variation de niveau (type ALFA-LAVAL) ;*
b) *chaudière à jets multiples (type SULZER).*



▼ *Dessin du projet de la centrale solaire THEM en cours d'étude, au centre de recherches de l'E.D.F. : ce projet prévoit la mise en place en 1980, de 500 miroirs de 50 m² chacun, focalisant les rayons solaires au sommet d'une tour haute de 100 m où sera installée une chaudière utilisant comme fluide un mélange de sels fondus.*

Photothèque E.D.F. - Sodel - M. Brigaud

Ces chaudières ont de multiples qualités. La conversion utilisée ne produit pas d'émissions et ne laisse aucun résidu ; il n'y a donc pas de contraintes sur l'environnement. Le fonctionnement est très sûr et peut être rendu automatique, sans grande complexité. Les frais d'investissement enfin sont peu élevés. Ces chaudières se présentent donc comme des générateurs idéals d'eau surchauffée ou de vapeur. La gamme de puissance des appareils disponibles sur le marché va de quelques centaines de kW à une trentaine de MW.

Il existe différents types de chaudières électriques. Pour les faibles puissances, elles se présentent sous la forme d'un bouilleur dans lequel ont été disposées des résistances électriques. Pour les puissances élevées, on utilise l'eau alimentaire dont on a élevé la conductivité en faisant agir un sel dissous (phosphate) comme élément de résistance entre des électrodes. Il devient alors facile de régler la puissance par simple variation d'un niveau ou d'un débit d'eau. En cas de manque d'eau, et on sait que c'est un des plus graves accidents qui menacent les autres types de chaudières où il est nécessaire d'ajuster en permanence la production de chaleur et son évacuation, la puissance est automatiquement ramenée à zéro.

On trouvera sur la *figure* 31 des schémas de chaudières électriques. Elles sont constituées par un corps qui supporte la pression vapeur et qui porte les trois électrodes de phase, le neutre du transformateur d'alimentation étant mis à la terre. Ces électrodes sont alimentées en moyenne tension 10 à 20 kV. Ces chaudières comportent un circuit de circulation qui permet d'une part d'homogénéiser la chauffe de l'eau et d'autre part de régler la puissance électrique, donc le débit de vapeur, par variation de niveau dans un cas ou par variation de débit dans l'autre cas.

La puissance peut être réglée sur une très large plage (5 à 100 % de la charge nominale). Les chaudières peuvent être de plus conservées à l'état chaud (marche en bouillotte) de façon à permettre un démarrage rapide.

Ces chaudières sont utilisées dans tous les secteurs de l'industrie. Elles sont recherchées pour les applications où la sûreté de fonctionnement et l'absence de nuisance sont primordiales : hôpitaux par exemple.

Chaudières solaires

Ces chaudières fonctionnent par conversion de l'énergie rayonnante d'origine solaire en énergie thermique. Des projets de centrales électrogènes utilisant ce type de chaudière sont actuellement à l'étude en France et dans d'autres pays. La solution considérée comme la plus adaptée à la réalisation de chaudières de grande puissance est celle de la « chaudière à tour ». Comment se présenterait une telle installation ?

Une forêt de miroirs orientables disposés au sol et commandés automatiquement concentre le rayonnement solaire sur une chaudière placée sur un pylône de 2 à 300 mètres. La superficie du champ de miroirs fixe la puissance de l'installation. Cette surface serait limitée, car, au-delà d'une certaine valeur (de l'ordre de 1,5 km^2) qui correspondrait à une puissance de 100 MW, il devient difficile de concentrer le rayonnement solaire sur la tour. Un « gisement solaire » serait exploité par juxtaposition de modules sur toute la surface disponible. Certains pays ont prospecté les zones qui pourraient être transformées en gisements solaires. Ce sont en général des zones d'altitude (au-dessus de 2 000 m) pour bénéficier de meilleures conditions d'ensoleillement, sans aucune vocation touristique. La Suisse par exemple disposerait de 50 km^2 environ de gisements solaires qui permettraient de fournir 10 % de la consommation électrique du pays.

La vapeur pourrait être produite directement dans le réservoir en haut du mât. Plus vraisemblablement, il sera préférable d'utiliser un fluide intermédiaire caloporteur du type liquide organique, pour éviter des pressions trop fortes dans cette partie de l'installation. Dans ce cas, la vapeur d'eau serait produite dans un générateur de vapeur placé au sol et utilisée dans un cycle thermodynamique classique pour produire de l'énergie mécanique et ensuite de l'électricité.

Quel est l'avenir de ces centrales solaires ? Les études économiques montrent qu'elles seraient susceptibles de concurrencer les autres systèmes à partir de 1990 pour s'imposer sur une large échelle au-delà de l'an 2000. Il sera donc intéressant de suivre les premières réalisations correspondant aux projets en cours.


Rapho

Tableau VIII
Classification des moteurs thermiques

Dégagement de chaleur	Avec mouvement		Sans mouvement
	Machines alternatives	Turbo machines	
Au sein du fluide moteur Moteurs à combustion interne	Moteurs à explosion Moteurs Diesel	Turbines à gaz à combustion	Stato-réacteurs Pulso-réacteurs Moteurs fusées à propulsion chimique
A l'extérieur du fluide moteur Moteurs à combustion externe	Machines alternatives à vapeur	Turbines à vapeur Turbines à gaz à circuit fermé	Moteurs fusées à propulsion non chimique

▲ ***En haut, la chambre froide d'une boucherie au Canada ; une installation frigorifique telle que celle-ci constitue une machine thermique au même titre qu'un moteur à explosion.***
En bas, tableau VIII : classification des moteurs thermiques.

Conversion thermomécanique

Les convertisseurs qui assurent la conversion de l'énergie thermique en énergie mécanique et la conversion inverse constituent la famille des *machines thermiques*. C'est ainsi qu'une installation frigorifique est une machine thermique au même titre qu'un moteur à explosion. Dans ce chapitre, nous ne nous intéresserons qu'aux machines motrices qui effectuent la conversion dans le sens chaleur vers travail mécanique. On sait que ces machines, capables de fournir du travail mécanique, font partie de la famille des moteurs.

Un *moteur thermique* a donc pour fonction de convertir la chaleur qui lui est fournie en énergie mécanique. Cette étiquette recouvre, on s'en doute, la plus grande partie des réalisations humaines destinées à la production d'énergie mécanique. Sur quelles bases pouvons-nous les classer ?

Cette tâche est malaisée, car il existe des habitudes difficiles à combattre et l'ambiguïté de certains termes complique sérieusement le problème. On trouvera dans le *tableau* VIII une classification des moteurs thermiques établie selon les principes suivants.

Relation entre le dégagement de chaleur et le fluide moteur

Une première distinction sera faite d'après la façon dont se fait le dégagement de chaleur. Ce dernier en effet peut prendre place au sein du fluide moteur (par combustion ou par réaction chimique), et, pour cette raison, on appelle les moteurs qui utilisent ce principe des *moteurs à combustion interne*.

Par opposition, le fluide moteur peut emprunter son énergie thermique à une source indépendante, et, dans ce cas, il reste étranger au mécanisme de production de chaleur et ne joue qu'un rôle *caloporteur* entre la source thermique et le moteur. Ces sources indépendantes sont constituées de tous les convertisseurs capables de transformer toute forme d'énergie en énergie thermique et qui

ont fait l'objet du précédent chapitre. Certains auteurs désignent les moteurs utilisant ce principe comme des *moteurs à combustion externe*.

Ce dernier vocable n'est pas admis par tous et, dans certains ouvrages, on confond même tous les moteurs thermiques dans le groupe des moteurs à combustion interne. Nous conserverons ici cette distinction malgré ses imperfections. La plus notable réside dans le fait que le terme combustion, spécifique de la conversion énergie chimique-énergie thermique, ne convient plus aux conversions en chaleur obtenues à partir de l'énergie nucléaire, électrique ou rayonnante. Nous sommes devant la situation qui se présente fréquemment dans le domaine de la technologie où la terminologie est dépassée par les progrès des machines.

Une autre ambiguïté vient des qualificatifs *interne* et *externe* qui tendent à faire croire que la combustion se produit dans un cas uniquement à l'intérieur du moteur et dans l'autre cas à l'extérieur du moteur. En fait, comme on l'a bien noté, ce n'est pas la relation entre « combustion » et « moteur » qui est visée mais celle qui peut exister entre la « combustion » et le « fluide moteur ». Dans le moteur à combustion interne, la conversion de l'énergie chimique du combustible en énergie thermique se fait au sein du fluide moteur, cette conversion, qui est en général une combustion, pouvant s'effectuer à l'extérieur du moteur proprement dit : c'est le cas par exemple pour une turbine de récupération fonctionnant sur l'échappement d'un moteur à explosion. Dans le moteur à combustion externe, il y a forcément découplage entre le fluide moteur et le fonctionnement de la source de chaleur : c'est le cas par exemple d'une turbine à vapeur attelée à une chaudière fonctionnant au fuel-oil. Ainsi prévenu, le lecteur n'aura pas de difficulté à admettre la classification proposée.

Mécanismes utilisés pour recueillir l'énergie mécanique

La méthode utilisée ici est habituelle. On considère d'une part les mécanismes qui mettent en jeu des pièces en mouvement, d'autre part les mécanismes entièrement statiques (*fig.* 32).

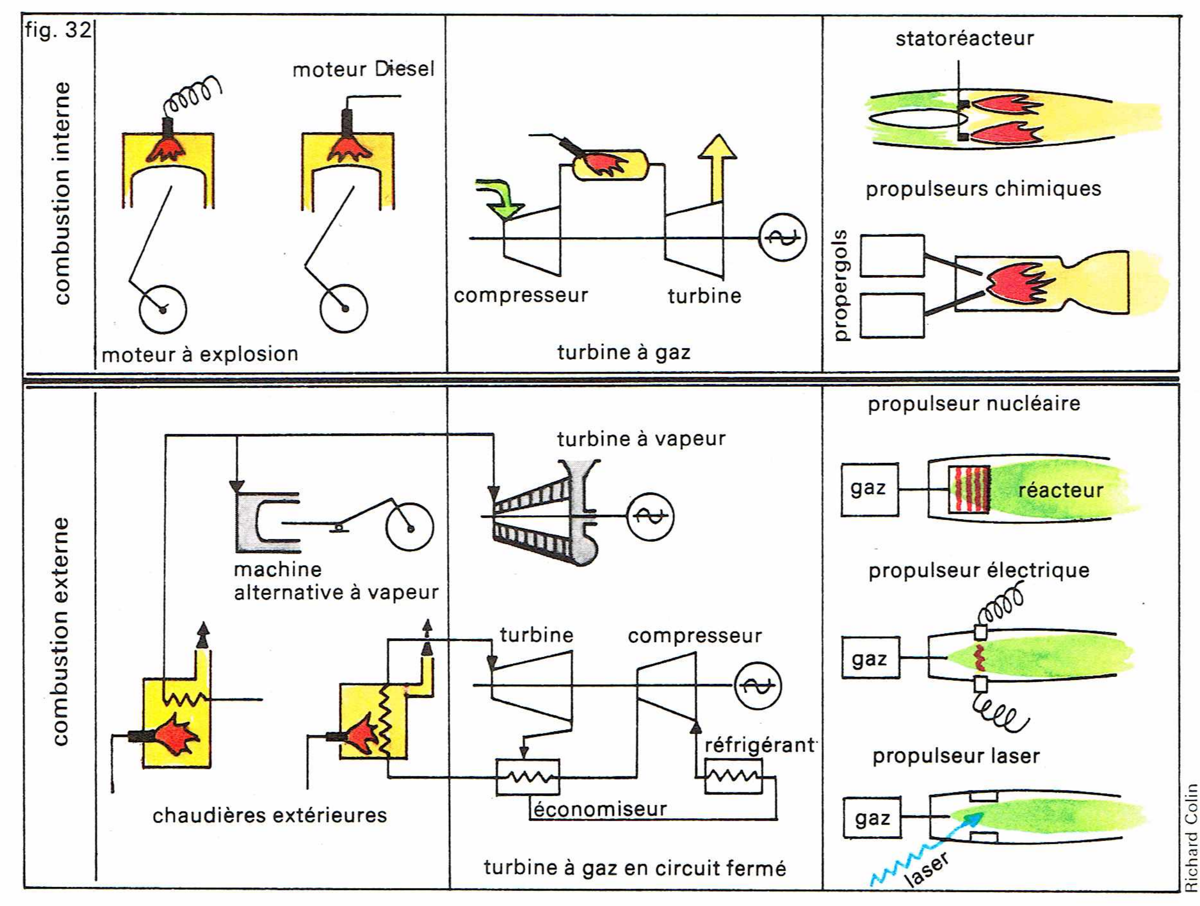
Dans le premier groupe, on distingue deux classes de moteurs : les *moteurs à mouvement alternatif* et les *turbomachines*. Dans les moteurs alternatifs, l'énergie interne est utilisée sous forme d'énergie de pression agissant sur un organe mobile appelé *piston*. Dans les turbomachines, l'échange d'énergie a lieu entre un flux continu du fluide moteur et un ensemble mécanique appelé *rotor* tournant autour de son axe. L'énergie du fluide est utilisée sous forme de pression (turbine à réaction) ou sous forme cinétique (turbine à action).

Dans ces machines, l'énergie mécanique est en général recueillie sur un arbre tournant qui peut être accouplé au récepteur qu'il s'agit d'entraîner : roue, hélice de bateau ou d'avion, rotor d'hélicoptère, générateur électrique, etc. L'énergie mécanique peut être également recueillie sous forme de poussée de la veine fluide sur le moteur lui-même, sans aucun autre intermédiaire : c'est la propulsion par réaction. Notons qu'il ne faut pas confondre la turbine à réaction évoquée ci-dessus et la propulsion par réaction. Certains moteurs comme le turbopropulseur utilisent les deux principes.

Dans les machines purement statiques, seul le principe de la réaction peut être utilisé pour recueillir l'énergie mécanique.

C'est la combinaison de ces deux éléments de classement : relation entre le dégagement de chaleur et le fluide moteur et mécanismes utilisés pour recueillir l'énergie mécanique, qui a permis la classification du *tableau* I.

On notera que les machines alternatives et les turbomachines constituent des classes très générales de machines, qui incluent certes les moteurs thermiques mais également d'autres types de machines. Les turbomachines par exemple comprennent les turbines à gaz et à vapeur mais également les turbines hydrauliques. Ces machines étant de plus réversibles, il faut ajouter à ce groupe les ventilateurs, les soufflantes, et les pompes à turbine. On aperçoit par cette remarque une autre façon de classer toutes ces machines. Mais un tel regroupement, pour aussi intéressant qu'il soit par le rapprochement de toutes les machines fonctionnant suivant des principes identiques, n'aurait pas été en accord avec l'idée de « conversion d'énergie » qui nous préoccupe dans ce chapitre. Les machines réceptrices citées ci-dessus qui transforment de l'énergie mécanique en énergie de même nature seront examinées au chapitre sur les transformateurs d'énergie.



▶ Figure 32 : *schémas des différents moteurs thermiques.*

Archives I.G.D.A.

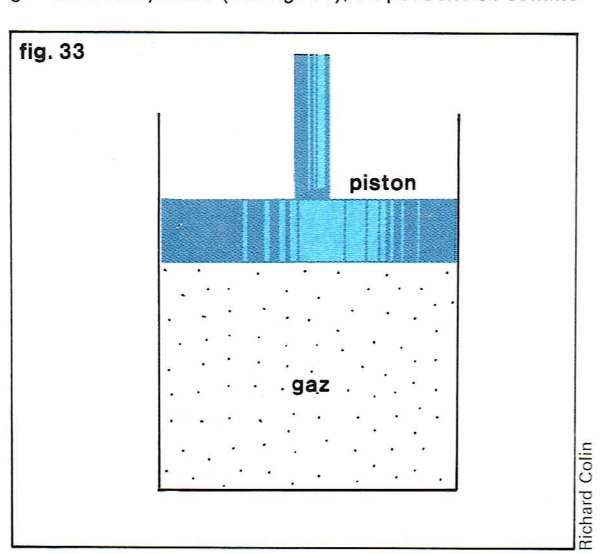
▲ *« Break » cinq places* **Peugeot** *de 1894, avec moteur à deux cylindres en* **V.**

Notions de thermodynamique

Un moteur thermique a pour fonction de rendre une certaine quantité d' « énergie mécanique » à partir de l' « énergie thermique » qui lui a été fournie. Les relations entre les phénomènes mécaniques et les phénomènes thermiques font l'objet de cette partie de la physique qu'on appelle la *thermodynamique.* On en rappelle ci-après les principales notions.

On appelle **système** un ensemble de corps ou de particules considérés séparément de leur environnement. On appelle **milieu extérieur** tout ce qui, par définition, n'appartient pas au système.

Exemple : si on considère un piston comprimant un gaz dans un cylindre (voir *fig.* 33), on peut choisir comme système le *gaz seul ;* le milieu extérieur est constitué du piston, du cylindre ou de l'ambiance. On peut aussi choisir comme système l'ensemble gaz-piston-cylindre, l'ambiance constituant alors le domaine extérieur.



Richard Colin

◀ *Figure 33 ; système thermodynamique simple ; un piston comprimant un gaz dans un cylindre.*

Un système est en **équilibre** lorsqu'il peut demeurer identique à lui-même indéfiniment. L'**état** dans lequel il se conserve peut être caractérisé par un certain nombre de paramètres dépendant de la complexité du système : par exemple, l'état physique d'un solide ou d'un liquide incompressible est déterminé par la seule température ; l'état physique d'une masse gazeuse est déterminé par deux paramètres : (pression, volume), (pression, température) ou (température, volume).

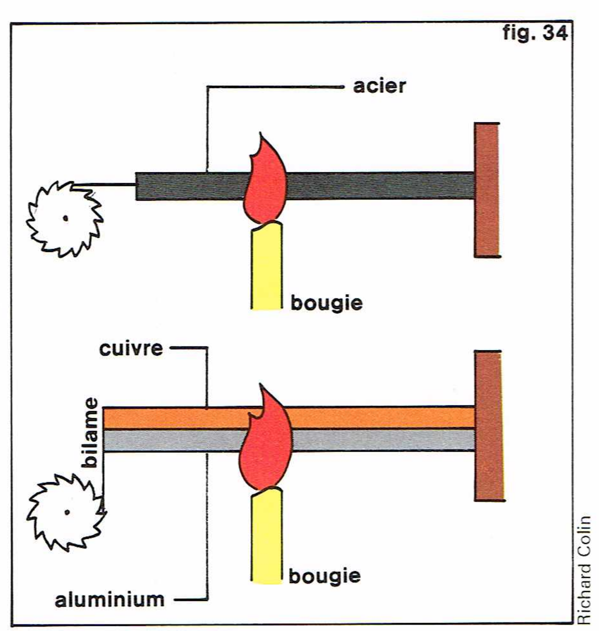
Un système a évolué de façon **réversible** d'un état d'équilibre A vers un état d'équilibre B lorsqu'il est possible de faire revenir le système B vers A en repassant par tous les états intermédiaires. En outre, les échanges d'énergie (travail et chaleur) avec le milieu extérieur sont égaux et de sens contraire. Les transformations réversibles n'existent pas en pratique. Des irréversibilités thermiques apparaissent par exemple chaque fois que des écarts finis de température existent entre deux points infiniment voisins du système.

• Premier principe : principe de Mayer ou de l'équivalence

Ce principe, qui s'appelle aussi principe de la conservation de l'énergie, peut s'énoncer : *Tant qu'un système demeure isolé du milieu extérieur, son énergie reste constante.* En conséquence, toute variation d'énergie de ce système ne peut provenir que de l'action du milieu extérieur. Tout système possède donc une *énergie interne* du seul fait qu'il existe dans un état physique donné ; on la désigne par U et elle s'exprime en joules.

La somme des quantités de travail W et de chaleur Q reçues par le système dans une transformation qui l'amène de l'état 1 à l'état 2 ne dépend que de l'état initial et de l'état final et est indépendante de la transformation qui l'amène de l'un à l'autre. S'il s'agissait d'un cycle,

▶ *Figure 34 : toute machine thermique motrice devra utiliser les déformations, sous l'influence de la chaleur, d'un corps quelconque. Ici, l'agent de transformation, la barre, évolue cycliquement ; d'où la nécessité de la chauffer puis de la refroidir successivement, ce qui suppose l'existence nécessaire de deux sources. Le bilame améliore les performances de la simple tige métallique, mais les solides ont des coefficients de dilatation trop faibles et on utilisera en général des corps très dilatables, comme les gaz ou les liquides sous forme « vapeur ».*



l'état final serait confondu avec l'état initial, et l'on aurait :

$$W + Q = 0$$

Si on appelle $W_f = - W$ l'énergie fournie au milieu extérieur, on a :

$$Q = W_f$$

C'est le principe d'équivalence de la chaleur et du travail. On connaît le rapport d'équivalence, désigné par J : 1 calorie = 4,185 5 joules.

● **Fonction d'état**

Tout état d'équilibre d'un système peut être défini par un ensemble de paramètres indépendants : pression, volume, température, etc. Toute fonction de ces paramètres est appelée *fonction d'état.* Sa valeur pour un état d'équilibre est indépendante de l'évolution qui a conduit à cet état d'équilibre (mathématiquement, on dit que cette fonction admet une différentielle totale exacte).

L'énergie interne U est une fonction d'état. On utilise beaucoup en thermodynamique pour caractériser les systèmes les fonctions d'état suivantes : l'enthalpie et l'entropie. On appelle *enthalpie,* rapportée à 1 kg de fluide, la grandeur $H = U + Jpv$, p étant la pression et v le volume spécifique.

La variation d'enthalpie est égale à la quantité de chaleur totale (échauffement, vaporisation, surchauffe) fournie au fluide augmentée de l'équivalent calorifique du travail représenté par la variation de pression.

Ces grandeurs s'expriment en kcal/kg ou kJ/kg. L'énergie interne n'étant définie qu'à une constante près, on la considère comme nulle à 0 °C. Cette convention est utilisée dans les diagrammes thermodynamiques. L'*entropie* sera définie plus loin.

● **Deuxième principe : principe de Carnot-Clausius**

Le premier principe a établi l'équivalence quantitative entre énergie mécanique et énergie chimique, le deuxième principe établit une différence qualitative entre ces deux formes de l'énergie. Autrement dit, si la conversion d'énergie mécanique en chaleur peut s'effectuer sans perte, la conversion inverse ne peut être que partielle. Une partie de la chaleur est cédée au milieu extérieur, donc perdue (*fig.* 34).

On peut démontrer qu'il ne peut y avoir de transformation en travail si un système n'échange de la chaleur qu'avec une seule source. Les cycles thermodynamiques habituels comportent donc des échanges avec deux sources : l'une est la source *chaude,* l'autre est la source *froide ;* ces deux qualificatifs indiquent seulement que la première est à une température plus élevée que la seconde.

Dans le cas d'un moteur thermique, si on appelle : W le travail fourni, Q_1 la chaleur cédée par la source chaude, Q_2 la chaleur reçue par la source froide, on peut écrire :

$$W = J\,(Q_1 - Q_2)$$

On appelle *rendement thermique* le rapport η de la quantité de chaleur utilisée $Q_1 - Q_2$ à la quantité de chaleur fournie Q_1

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{W}{JQ_1}$$

$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

Le rendement η est évidemment inférieur à l'unité.

L'énoncé du deuxième principe se complète par le théorème suivant ou théorème de Carnot : *Le rendement thermique maximal ne dépend que des températures des 2 sources entre lesquelles le fluide évolue.* Si T_1 et T_2 sont les températures (en degrés Kelvin) des sources chaude et froide, le rendement maximal est donné par :

$$\eta_{\text{Carnot}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

Exemple : si on considère une centrale nucléaire à eau légère dont la vapeur saturée sort de la chaudière à 70 bars ($t_1 = 286$ °C) et qui utilise une source froide constituée par une rivière à la température $t_2 = 20$ °C, on a :

$$T_1 = 286 + 273 = 559 \text{ °K}$$

$$T_2 = 20 + 273 = 293 \text{ °K}$$

$$\eta_{\text{Carnot}} = \frac{559 - 293}{559} = 0{,}47$$

Il s'agit d'un rendement maximal théorique. Cela signifie que, quelle que soit l'ingéniosité du moteur thermique utilisé, le rendement ne pourra pas dépasser cette valeur limite. En pratique, le rendement de ce type de réacteur est de 0,33, ce qui montre le degré de l'imperfection « thermodynamique » de nos moteurs thermiques. On expliquera plus loin ces écarts.

● **Entropie**

Clausius a montré que, dans une transformation ouverte dont l'état initial A diffère de l'état final B, l'intégrale $\int_{AB} \frac{dQ}{T}$ était indépendante du chemin réversible utilisé et ne dépendait que des états initial et final

$$\int_{AB} \frac{dQ}{T} = S_A - S_B$$

S est une fonction d'état qui a été appelée *entropie.* La variation d'entropie est nulle quand le cycle est fermé. L'unité qui exprime l'entropie est le J/°K. L'entropie n'est définie, comme les autres fonctions d'état, qu'à une constante près ; pour l'eau, on convient de la considérer comme nulle à 0 °C et à la pression de vapeur saturée correspondante.

La notion d'entropie est abstraite. Elle est pourtant très utile, car elle permet d'apprécier l'irréversibilité d'un processus. En effet, si toutes les transformations accomplies dans un cycle sont réversibles, l'entropie du système ne change pas. Il y a eu transfert d'entropie au cours des diverses transformations, mais non augmentation. Ce n'est pas le cas lorsque les transformations sont irréversibles.

● **Représentation graphique des transformations thermodynamiques**

Les paramètres décrivant les états d'un fluide au cours d'une transformation sont :
— soit thermiques : température, chaleur totale, entropie ;
— soit mécaniques : pression, volume.

On peut donc suivre leurs évolutions sur différents diagrammes suivant le but recherché. Les diagrammes les plus utilisés sont :
● le diagramme dynamique (ou diagramme de Clapeyron) [*fig.* 35a] ;
ordonnées : pression p ; abscisses : volume v ;
● le diagramme entropique (*fig.* 35b) ;
ordonnées : température absolue T ; abscisses : entropie S ;
● le diagramme enthalpique (ou diagramme de Mollier) ;
ordonnées : chaleur totale H ; abscisses : entropie S (*fig.* 35c).

Certaines transformations (*fig.* 36) se font avec un paramètre constant, les courbes les représentant sont désignées comme suit :

pression : $p = C^{st}$ isobare ;
volume : $v = C^{st}$ isochore ;
température : $T = C^{st}$ isotherme.

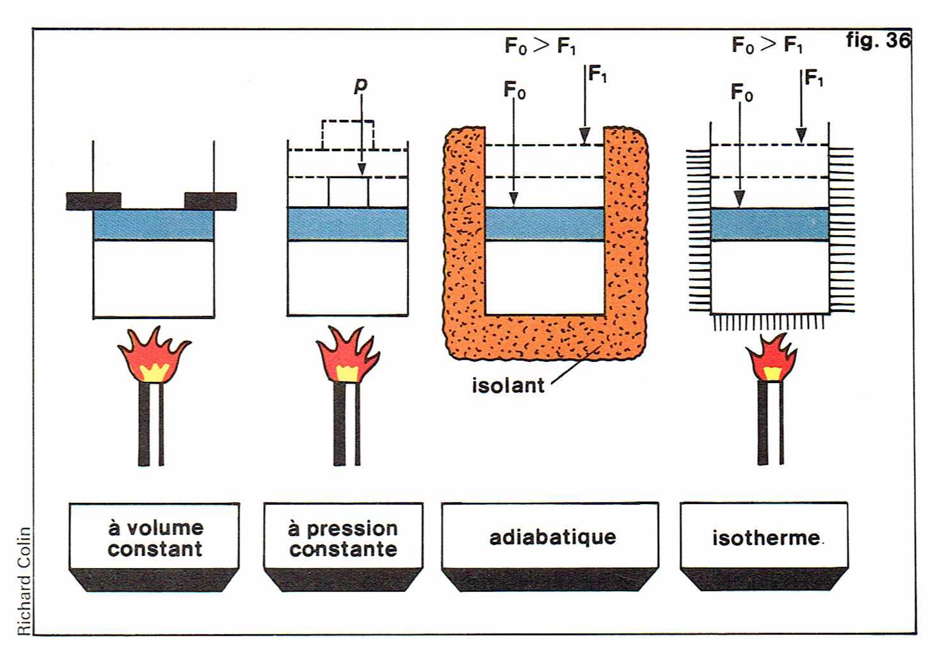
On appelle transformation adiabatique, une transformation où les échanges de chaleur avec l'extérieur sont nuls. Au cours d'une telle transformation, l'entropie reste constante : la courbe « adiabate » est donc aussi « isentrope ».

L'allure de ces différentes courbes est représentée sur les diagrammes de la *figure* 35.

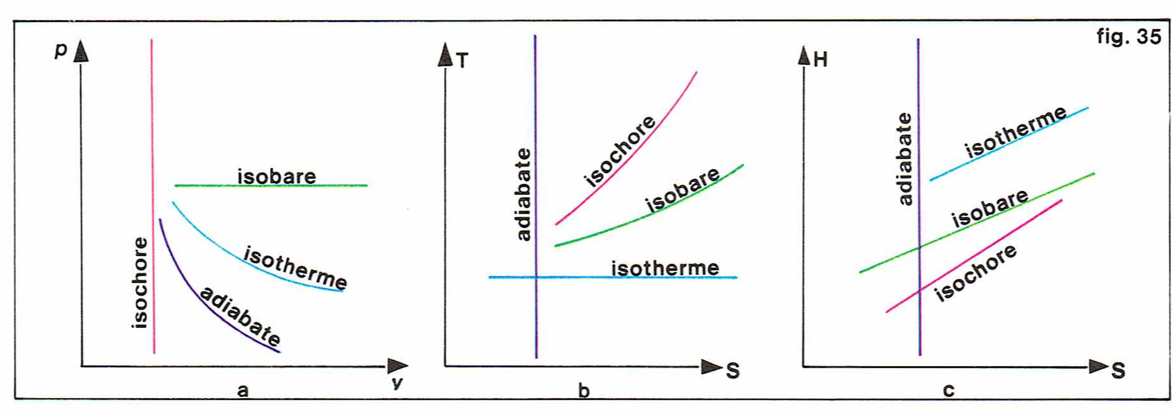
• **Cycles**

Les cycles sont représentés sur les diagrammes à l'aide de courbes traduisant les différentes transformations qui constituent le cycle.

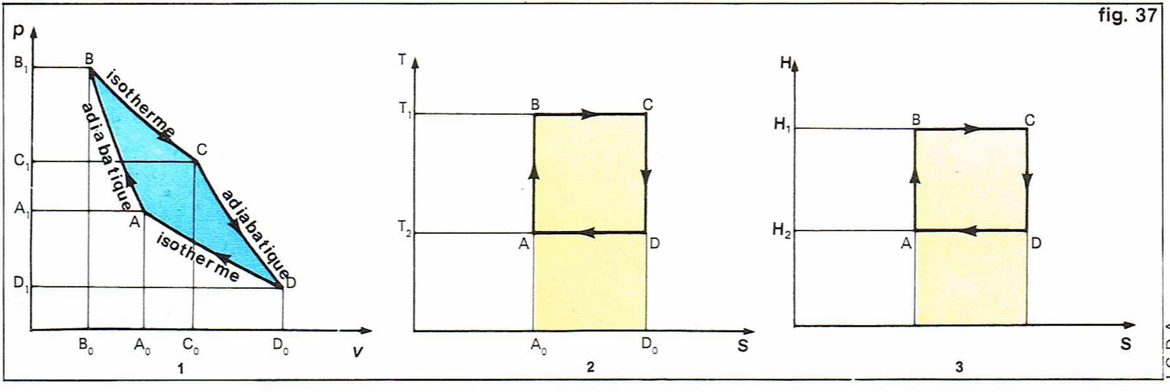
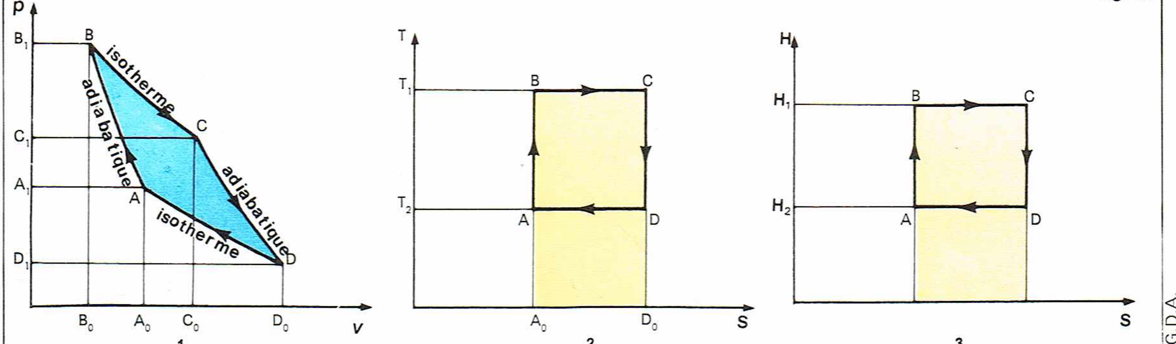
La *figure* 37 représente un cycle de Carnot porté sur le diagramme de Clapeyron (*p*, *v*). L'aire délimitée par la courbe représente le travail échangé avec le milieu extérieur. Ce travail est positif ou négatif selon le sens dans lequel le cycle est décrit. La même figure représente un cycle de Carnot sur un diagramme entropique (T, S). Ce cycle qui se compose de transformations irréversibles, deux isothermes et deux adiabatiques (isentropiques), se présente sous la forme d'un rectangle. On montre que l'aire du cycle représente dans ce cas la chaleur échangée avec le milieu extérieur qui est positive ou négative suivant le sens décrit.



▲ *Figure 36 : les quatre grandes transformations thermodynamiques.*



◀ *Figure 35 ; les diagrammes les plus utilisés :*
a) *diagramme de Clapeyron,*
b) *diagramme entropique,*
c) *diagramme enthalpique.*

◀ *Figure 37. (1) Cycle de Carnot porté sur un diagramme de Clapeyron ; il se compose de 4 transformations réversibles :* AB = *compression adiabatique,* BC = *détente isotherme (fourniture de* Q_1 *calories par la source chaude),* CD = *détente adiabatique,* DA, *compression isotherme (*Q_2 *calories cédées à la source froide). L'aire* ABCD *représente le travail* $\overline{W}$ *du cycle avec* $W = W_1 + W_2 + W_3 + W_4 =$ — *aire* ABB_0A_0 + *aire* BCC_0B_0 + *aire* CDD_0C_0 — *aire* DAA_0D_0.
(2) Le même cycle porté sur un diagramme entropique : aire ABCD = *travail du cycle, aire* A_0BCD_0 = *chaleur* Q_1 *fournie à la source chaude, aire* A_0ADD_0 = *chaleur* Q_2 *cédée à la source froide.*
(3) Même représentation sur le diagramme enthalpique : $H_2 - H_1$ = *travail de la compression adiabatique* AB.
$H_1 - H_2$ = *travail de la détente adiabatique* CD.

Moteurs à combustion interne

Sur ces machines, la combustion est réalisée au sein du fluide moteur. Il est donc nécessaire d'utiliser des combustibles pouvant brûler rapidement et complètement sans laisser de résidus solides. Ces combustibles sont en général à base d'hydrocarbures liquides ou gazeux et l'air sert de comburant. On verra plus loin que les fusées, en particulier lorsqu'elles travaillent en dehors de l'atmosphère terrestre, utilisent des couples carburant-comburant très différents.

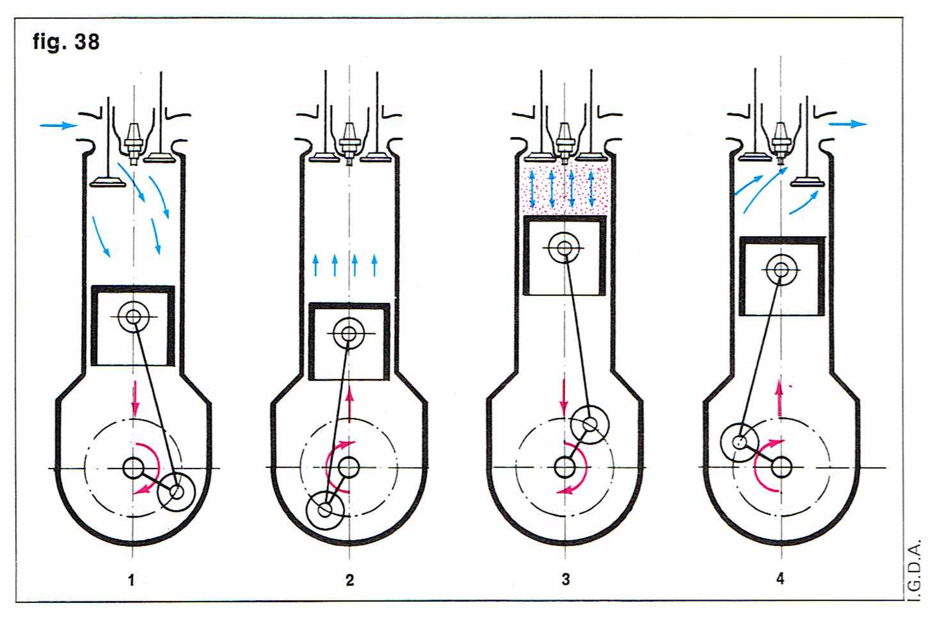
La combustion interne permet d'obtenir dans ce type de moteur des puissances spécifiques très élevées. Cette puissance spécifique est directement liée au débit de combustible qu'on peut faire accepter par le moteur, et par voie de conséquence au débit de carburant. Pour cette raison, les moteurs à combustion interne se classent, par ordre croissant de puissance spécifique :

— moteurs à explosion et Diesel non suralimentés,
— moteurs à explosion et Diesel suralimentés,
— turbines à gaz,
— fusées.

Pour les machines tournantes (alternatives ou turbomachines), les débits d'air et donc de combustible mis en jeu sont en relation directe avec la vitesse du moteur. Lorsque la légèreté est primordiale, on retiendra donc des moteurs rapides, même si des organes d'adaptation (boîte de vitesses par exemple) sont nécessaires.

Les domaines de puissance s'étendent pour les moteurs Diesel de quelques kW à plus de 20 MW alors que celui des moteurs à explosion se limite aujourd'hui à 300 kW. Le domaine de la turbine à gaz s'étend progressivement, et aujourd'hui les turbines industrielles les plus grosses en service ont des puissances de 80 MW.

Le rendement thermique global d'un moteur à combustion interne est le rapport qui existe entre l'énergie



▲ *Figure 38 ; phases du cycle à 4 temps : 1, admission ; 2, compression ; 3, combustion-détente ; 4, échappement.*

recueillie sous forme de travail pendant un certain temps et l'énergie du combustible brûlé par le moteur pendant le même intervalle de temps.

Pour permettre l'étude et l'amélioration d'un moteur, on distingue différents rendements :

— rendement thermodynamique théorique, qui peut se calculer sur le cycle théorique ;

— rendement de forme, qui traduit que le cycle réel du moteur diffère du cycle théorique ;

— rendement de combustion, qui prend en considération les pertes de combustion (imbrûlés) et la chaleur perdue par les parois ;

— rendement mécanique qui traduit essentiellement la perte par frottement.

Le rendement thermique global est le produit de ces quatre rendements.

Moteur à volume variable (capsulisme)

Ces moteurs se classent en deux familles :

— moteurs à explosion,

— moteurs Diesel.

Ils sont en général à pistons et se distinguent par la façon dont est initiée la combustion.

Moteurs à explosion

* *Description sommaire*

Le moteur comprend plusieurs cylindres, fermés à une de leurs extrémités, dans chacun desquels se meut un piston. Le mouvement rectiligne et alternatif de ces pistons entre deux points extrêmes : le point mort haut (PMH) et le point mort bas (PMB), est transformé en un mouvement circulaire et continu par un ensemble de bielles et un arbre moteur, appelé aussi vilebrequin. Chaque cylindre peut être mis en communication avec l'admission ou avec l'échappement par deux soupapes commandées par le moteur lui-même. Enfin un dispositif d'allumage est placé sur le fond du cylindre. Ce type de moteur peut fonctionner suivant un cycle à 4 temps ou un cycle à 2 temps.

Le cycle à 4 temps ou cycle Beau de Rochas (brevet déposé en 1862) peut être décrit de la façon suivante, chaque temps correspondant à une course aller ou retour du piston dans le cylindre (voir *fig.* 38) :

a) Aspiration ou admission : introduction d'un mélange gazeux par la soupape d'admission.

b) Compression du mélange gazeux du type adiabatique, car les échanges thermiques avec la paroi sont très faibles. L'allumage est commandé vers la fin de ce temps.

c) Détente également adiabatique des gaz de combustion.

d) Évacuation du cylindre des gaz de combustion par la soupape d'échappement.

Ce cycle demande donc pour s'accomplir 4 courses de piston et 2 tours du vilebrequin. Sur les quatre temps, un seul est utile (détente) pour fournir un effort au vilebrequin. Les trois autres, au contraire, demandent de l'énergie au vilebrequin. Le couple d'un moteur qui serait monocylindrique serait forcément très irrégulier et c'est pour cette raison que l'on construit surtout des moteurs à plusieurs cylindres.

Dans le cycle 2 temps, l'évacuation des gaz de combustion se fait en fin de détente et la compression se place en fin d'admission. Ce type de moteur a un poids moindre puisqu'il permet un temps de travail pour tous mais sa consommation est plus élevée et il est actuellement limité aux petites cylindrées.

* *Cycle théorique — Cycle réel*

Ce moteur fonctionne avec un allumage commandé. La combustion se fait en théorie à volume constant (piston au PMH) et de façon adiabatique. On l'appelle moteur à explosion, bien que la vitesse de propagation de la flamme dans le mélange gazeux soit de beaucoup inférieure à celle des conditions explosives.

Le cycle théorique à 4 temps (*fig.* 39) comprend les transformations suivantes :

1-2 : aspiration à pression constante (pression atmosphérique),

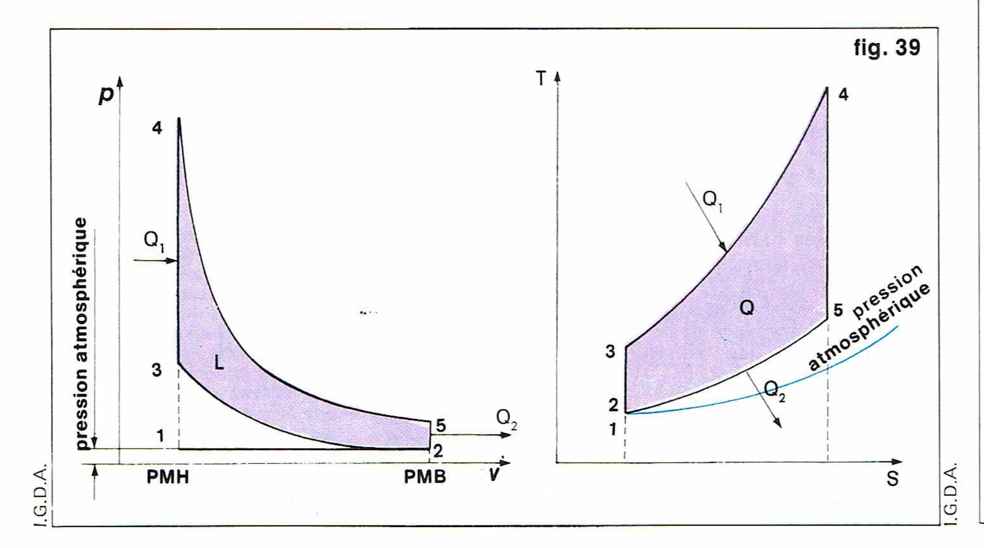
2-3 : compression adiabatique,

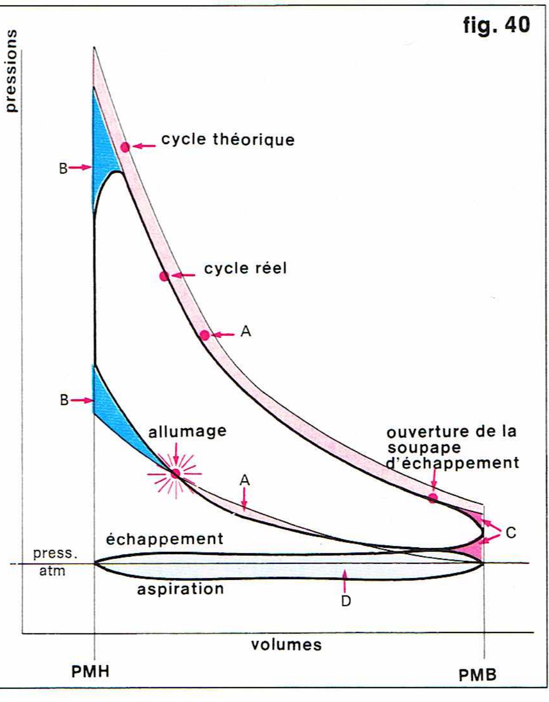
3-4-5 : combustion à volume constant et détente adiabatique,

5-2-1 : mise à l'échappement du cylindre et évacuation des gaz de combustion à pression constante (pression atmosphérique).

Le cycle réel diffère du cycle théorique sur plusieurs points (*fig.* 40). Pendant l'aspiration, il y a dépression

▼▶ *Ci-dessous, figure 39 : cycle théorique Beau de Rochas en coordonnées pv (à gauche) et TS (à droite). Ci-contre, figure 40 : comparaison entre les cycles Beau de Rochas théorique et réel.*





dans le cylindre et la pression descend en dessous de la pression atmosphérique. La compression ensuite n'est pas rigoureusement adiabatique, car des échanges thermiques se produisent avec la paroi. De plus, la combustion n'étant pas instantanée, il faut placer l'allumage avant la fin de la compression (avance à l'allumage). La détente enfin n'est pas non plus adiabatique et il faut ouvrir la soupape d'échappement avant la fin de la course du piston ; après l'échappement, le cylindre reste en légère surpression.

La surface du cycle réel est donc inférieure à celle du cycle théorique dans un rapport qui est de l'ordre de 0,7 au maximum.

* *Rendement — Bilan thermique*

Le rendement global des moteurs à explosion varie suivant les modèles entre 0,25 et 0,40. On l'exprime aussi très souvent en donnant la consommation spécifique qui est la consommation en carburant du moteur rapportée au cheval-heure (unité : g/ch-h).

Le bilan thermique (voir *fig.* 41) permet de montrer comment se répartissent les calories entre le travail fourni et les différentes pertes.

* *Puissance*

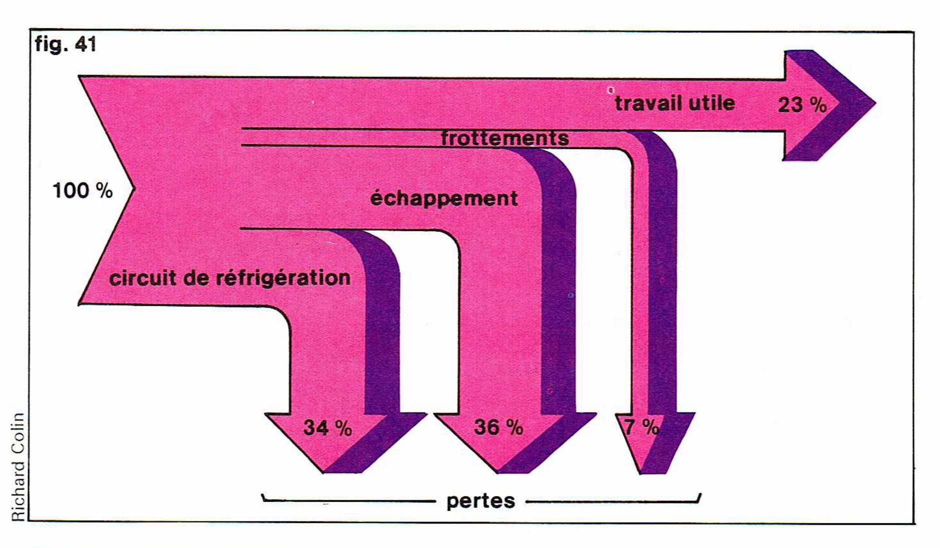
Compte tenu de tous les facteurs agissant sur le fonctionnement d'un moteur à explosion, il est difficile de déterminer sa puissance par des calculs théoriques. Les paramètres sont en effet nombreux : qualité du combustible, densité de l'air, réglage du moteur pour ne citer que les principaux. La puissance d'un moteur est donc généralement mesurée sur un banc d'essai, le moteur étant accouplé avec un système de freinage pour absorber sa puissance : c'est « l'essai au frein » qui permet de mesurer la puissance effective du moteur. Il existe plusieurs définitions de la puissance (SAE, DIN, etc.) selon que l'on prend en compte la puissance des auxiliaires du moteur ou non. Chaque pays a aussi une définition de « puissance fiscale » destinée à l'imposition des véhicules.

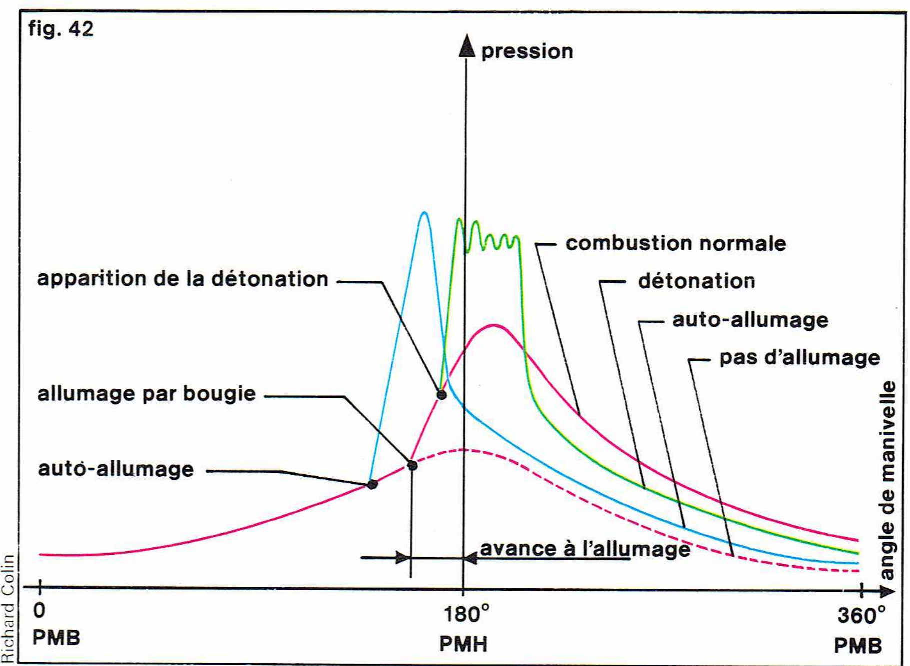
On peut retenir simplement que la puissance est fonction de la cylindrée (section πD_2), de la course C du piston, de la vitesse N et de la pression dans le cylindre au cours du temps de détente. Comme cette pression est variable, on définit une pression moyenne p_m qui, appliquée sur le piston durant toute la course de détente, fournirait le même travail que la pression réelle (*fig.* 42). Cette pression moyenne est caractéristique des performances d'un moteur ; elle traduit aussi la fatigue mécanique et thermique que celui-ci aura à supporter.

Compte tenu des remarques précédentes, la puissance d'un moteur peut s'exprimer simplement ainsi :

$$P = kD^2CNp_m$$

k étant fonction des unités choisies et du nombre de cylindres.



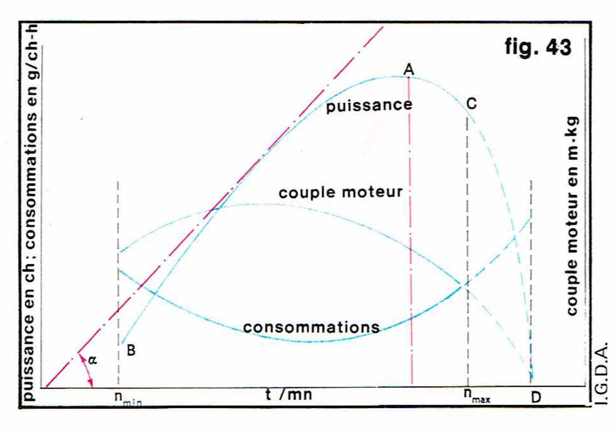


▲ *Figure 41 : bilan thermique moyen d'un moteur à explosion.*
Figure 42 : combustion dans un moteur à allumage commandé.



◀ *La puissance d'un moteur est généralement mesurée sur un banc d'essai (ici, banc d'essai Renault).*

▶ *Figure 43 : les courbes caractéristiques d'un moteur à explosion.*



On trouvera sur la *figure* 43 les courbes caractéristiques d'un moteur. On notera la diminution de rendement aux faibles et aux fortes charges, ou autrement dit une augmentation à ces régimes de la consommation spécifique. On voit donc qu'il existe un régime optimal de consommation.

* *Combustion*

La combustion du mélange de l'air avec le combustible est déclenchée par une étincelle jaillissant entre les électrodes d'une bougie. Cet amorçage n'est possible que si la proportion du mélange ne diffère pas trop du rapport exact de combustion (rapport stœchiométrique). Si l'air est en excès, on parle de mélange « pauvre », dans le cas contraire de mélange « riche ». Pour des raisons de rendement, on s'efforce de conserver un léger excès d'air, de façon à brûler la quasi-totalité du combustible.

Malgré la modification de la nature du fluide gazeux apportée par la combustion, on peut considérer, et c'est ce qu'exprime le cycle Beau de Rochas, que la combustion se fait à volume constant, ainsi que la mise à l'échappement (isochores 3-4 et 5-6). On montre que le rendement de ce cycle thermodynamique n'est finalement fonction que du rapport $\frac{V'}{V} = \rho$ qui est appelé « rapport volumétrique de compression ». L'expression du rendement est $\eta = 1 - \frac{1}{\rho^{\gamma - 1}}$.

On cherche donc à augmenter ce rapport volumétrique de compression.

Cependant on constate qu'il n'est pas possible avec un carburant donné de dépasser une certaine valeur du rapport volumétrique de compression sans qu'apparaisse le phénomène de la « détonation ». Celle-ci est provoquée par l'augmentation brutale de la vitesse de combustion qui prend un caractère explosif. Elle se manifeste par un phénomène sonore haute fréquence (5 à 10 000 Hz), appelé « cliquetis » qui peut avoir des conséquences graves sur le moteur : perte de rendement, donc échauffement provoquant des « coups de feu » aux soupapes.

Il ne faut pas confondre la détonation avec l'auto-allumage, qui est un allumage prématuré qui se produit, comme c'est le cas dans le cycle Diesel, lorsque la température d'inflammation est atteinte en un point du mélange. Ce phénomène se manifeste sur les moteurs à explosion lorsque la chambre de combustion présente des points chauds (dépôts ou bougies mal refroidies). Il se produit alors des chocs sur l'embiellage, bruits qu'il faut donc distinguer du cliquetis.

On a déjà noté l'influence prépondérante de la nature du combustible utilisé sur le phénomène de détonation. Celui-ci en effet subit pendant la compression et le début de la combustion des réactions d'oxydation qui entraînent la formation de produits à basse température d'inflammation, ce qui donne à la fin de la combustion une allure explosive.

La résistance d'un carburant donné au phénomène de détonation est mesurée par l'*indice d'octane*. Cet indice est obtenu par comparaison, dans un moteur normalisé, du carburant à essayer avec un mélange de deux carburants de référence, l'un étant très détonant (heptane C_7H_{16}) et l'autre peu détonant (iso-octane : C_8H_{18}). Le pourcentage en volume d'iso-octane nécessaire pour réaliser avec l'heptane un mélange équivalent du point de vue de la détonation avec le carburant essayé représente l'indice d'octane. D'après cette définition, l'heptane a l'indice 0, l'iso-octane l'indice 100. Plus l'indice est élevé, plus le carburant résiste bien à la détonation. L'essai est effectué suivant des méthodes normalisées qui correspondent à des conditions de fonctionnement des moteurs différentes. En France, actuellement, l'indice d'octane (mesuré par la méthode appelée : *Research Method*) est de 90 pour l'essence ordinaire et de 95-98 pour le supercarburant. L'indice d'octane peut atteindre 120 pour l'essence d'aviation, car les moteurs d'avion, très « poussés », ont des rapports volumétriques de compression élevés. L'indice est alors mesuré par d'autres méthodes que celle présentée ci-avant.

Les réactions d'oxydation subies par le carburant et entraînant la détonation peuvent être inhibées par l'addition de composés antidétonants dont le plus connu est le plomb tétraéthyle [Pb $(C_2H_5)_4$].

* *Carburation*

Pour assurer la combustion aussi complète que possible du carburant, il est nécessaire que son mélange avec l'air soit correctement dosé. Cette opération de dosage porte

Nat's photo

▶ *Moteur réalisé par E. Langen et N. A. Otto (1867).*

fig. 45

calibreur d'air de ralenti
gicleur de ralenti
filtre
arrivée d'essence
pointeau
circuit de ralenti
flotteur
papillons des gaz
injecteur de la pompe de reprise
buse d'air (venturi)
tube d'émulsion
vers l'injecteur de la pompe de reprise
vis de richesse
gicleur d'alimentation
pompe de reprise (à membrane)

Richard Colin

▲ ***Figure 45 :*** ***coupe schématique du carburateur Solex inversé type 32* DIS *(Solex)* [*extrait documentation Solex*].**

le nom de *carburation*. Celle-ci peut se faire à l'extérieur du moteur dans un appareil appelé *carburateur*. Si le carburant est liquide, il peut être injecté directement dans le cylindre : on parle alors de moteur à injection. Les carburants liquides utilisés sont surtout l'essence, mais aussi des carburants comme l'alcool ou le benzol. On peut également utiliser des gaz comme le gaz naturel, le butane ou le propane. Dans ce cas, le carburateur se réduit à une simple tuyère convergente-divergente au col de laquelle est introduit le gaz.

Le carburateur se compose essentiellement d'une cuve à niveau constant et d'une chambre de carburation. La cuve est alimentée à partir du réservoir, soit par gravité, soit à l'aide d'une pompe. Le niveau est maintenu à peu près constant par un flotteur qui porte un pointeau chargé d'obturer l'arrivée d'essence si le niveau dépasse la valeur normale. Cette cuve communique avec la chambre de carburation par un orifice calibré, ou *gicleur*. Cette chambre de forme cylindrique est en communication d'un côté avec l'atmosphère, de l'autre avec la tuyauterie d'admission du moteur. Elle a la forme d'une tuyère convergente-divergente. Au voisinage du col de la tuyère se trouve placé le gicleur. Au-delà du divergent, appelé aussi diffuseur, se trouve un « papillon » qui permet de faire varier la quantité de mélange carburé admis dans le moteur, et donc la puissance du moteur. Quand le moteur tourne, les cylindres sont successivement en communication avec la tuyauterie d'admission lors du temps d'aspiration (la soupape d'admission est alors ouverte), et le piston dans sa course descendante entraîne un appel d'air dans le carburateur. La vitesse de l'air est augmentée au col de la tuyère, créant ainsi une dépression qui permet l'aspiration du carburant par le gicleur.

Cette dépression étant d'autant plus grande que le régime du moteur est élevé et que le papillon est plus ouvert, la simple commande de ce papillon permet le réglage de puissance du moteur.

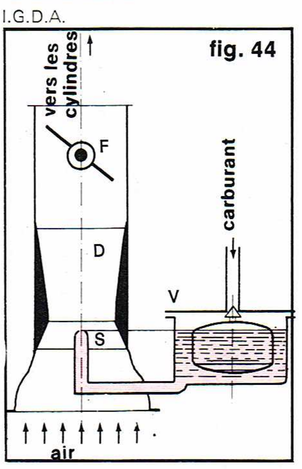
En pratique, un carburateur aussi simple que celui qui vient d'être décrit (voir *fig.* 44) fonctionnerait très mal. L'augmentation du débit d'air en fonction de la dépression suit en effet une loi de type parabolique alors que le débit de combustible entraîné suit une loi linéaire. Si le carburateur est bien réglé aux basses charges, le mélange sera trop riche à la puissance nominale; inversement, si le carburateur fonctionne bien aux fortes charges, il sera inopérant aux basses charges. Il faut donc apporter des modifications à ce carburateur simplifié pour qu'il délivre à toutes les allures du moteur un mélange convenablement dosé.

Ces dispositions complémentaires s'appliquent principalement à la marche au ralenti, au démarrage à froid et aux reprises de charge après une baisse de régime du moteur. Un carburateur se présente donc comme un appareil de principe très simple mais dont la réalisation est complexe pour qu'il puisse remplir son rôle convenablement (*fig.* 45).

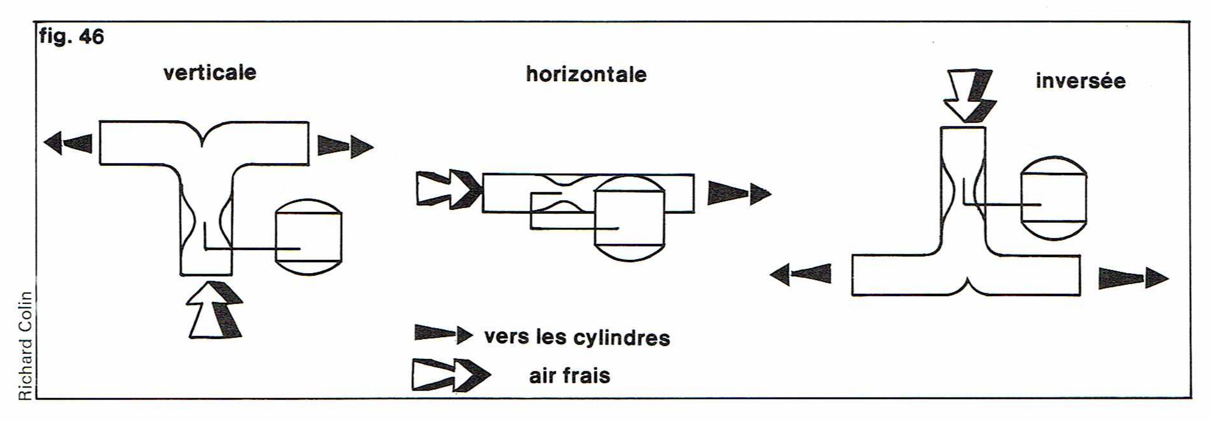
La vitesse de l'air dans la tuyauterie d'admission est insuffisante pour assurer une bonne pulvérisation. De plus, il est très difficile de distribuer convenablement, dans des conditions identiques de quantité et de dosage, le mélange carburé aux différents cylindres du moteur. Pour ces raisons, on a cherché de nouvelles solutions au problème de la carburation, problème résolu en partie par le carburateur, mais d'une façon approximative. Une solution intéressante est celle de l' « injection » par pompe et injecteur comme sur les moteurs Diesel. Chaque cylindre dispose d'un injecteur et le dosage de l'air et du carburant peut donc être effectué individuellement cylindre par cylindre dans les conditions exactement requises par le régime du moteur. L'injection se fait à haute pression pour l'injection directe (dans le cylindre), à basse pression pour l'injection indirecte (dans la tubulure d'admission). Dans ce deuxième cas, le plus répandu, l'injection se fait à une pression plus faible (10 à 20 bars) pour plus de 100 bars en injection directe (*fig.* 46).

▼ ***Figure 44 :*** ***principe d'un carburateur élémentaire.***

I.G.D.A.



▶ *Figure 46 : les trois types de disposition des carburateurs.*



Les moteurs à injection présentent d'autres avantages. En raison de la durée limitée de contact entre le carburant et l'air, les phénomènes d'oxydation propices à la détonation n'ont guère le temps de se produire, ce qui permet d'augmenter le taux de compression ou d'utiliser des carburants de médiocre résistance à la détonation. De plus, grâce à un meilleur dosage en fonction du régime, la consommation d'un moteur à injection est inférieure dans les mêmes conditions de service à celle d'un moteur à carburation classique, et les cas de marche particuliers comme le démarrage à froid ou les reprises sont nettement facilités. Mais l'injection n'a pas que des avantages. Les injecteurs et les pompes d'injection sont des appareils de haute précision, difficiles à fabriquer et donc onéreux. Une des difficultés de fonctionnement des pompes d'injection provient du fait que l'essence, contrairement au combustible Diesel, n'est pas capable d'assurer le graissage des pistons. Malgré des avantages, dont le plus intéressant est la réduction de consommation, les moteurs à injection n'ont pas encore connu, en particulier dans le domaine de l'automobile, un développement très important.

Une autre solution développée pour améliorer la carburation est celle de la pulvérisation forcée. Le procédé consiste ici à améliorer l'atomisation du carburant en injectant, après le carburateur, dans le mélange déjà carburé, de l'air à très grande vitesse produit par une petite soufflante débitant dans une tuyère. Ce procédé donne de bons résultats pour un coût inférieur à celui de l'injection.

* *Allumage*

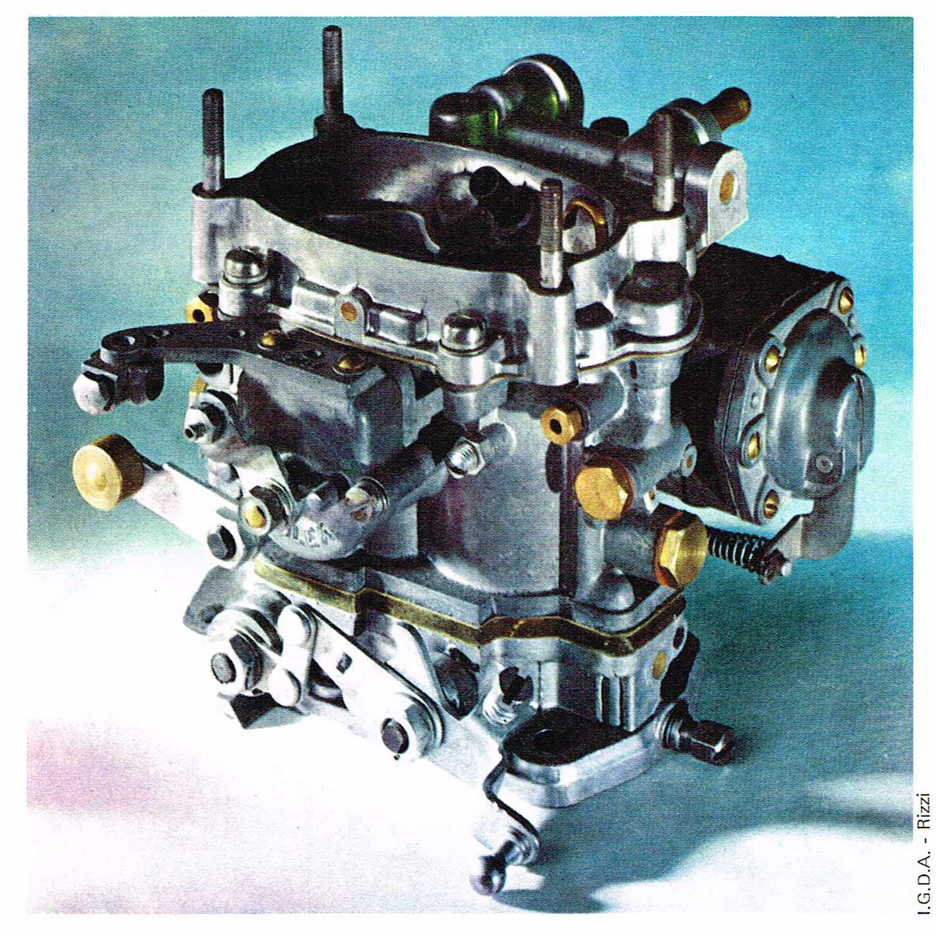
Le déclenchement de la combustion, ou allumage, est assuré par une étincelle électrique jaillissant entre les deux électrodes d'une bougie portées à une différence de potentiel de l'ordre de 10 000 volts. L'électrode centrale, isolée du culot de la bougie, est reliée au circuit d'allumage; l'autre électrode est portée généralement par le culot et se trouve de ce fait à la masse. Le circuit d'allumage a pour rôle de distribuer la haute tension sur les têtes de bougies aux instants précis où l'allumage doit être commandé. Les systèmes les plus anciens et les plus couramment employés sont l'allumage par batterie et l'allumage par magnéto. Depuis quelques années est apparu l'allumage électronique.

Le système d'*allumage par batterie* comprend un transformateur, appelé habituellement bobine, au rapport de transformation très élevé. Son circuit primaire, alimenté en basse tension par la batterie, comporte un système appelé *rupteur* qui coupe périodiquement le circuit. La variation de courant induit dans le circuit secondaire un courant haute tension qui est envoyé aux bougies par l'intermédiaire d'un distributeur. Pour que l'ensemble fonctionne, on voit que le fonctionnement du rupteur et du distributeur doit être synchronisé avec la rotation du moteur. Ceci est très simplement réalisé par un dispositif tournant ou *allumeur* entraîné par le moteur lui-même et qui comporte à la fois le rupteur (vis platinée) et le doigt de distribution. Pour éviter la détérioration du rupteur par le courant de coupure, un condensateur est disposé sur le circuit primaire pour absorber ce courant et éviter une étincelle au rupteur (*fig.* 47).

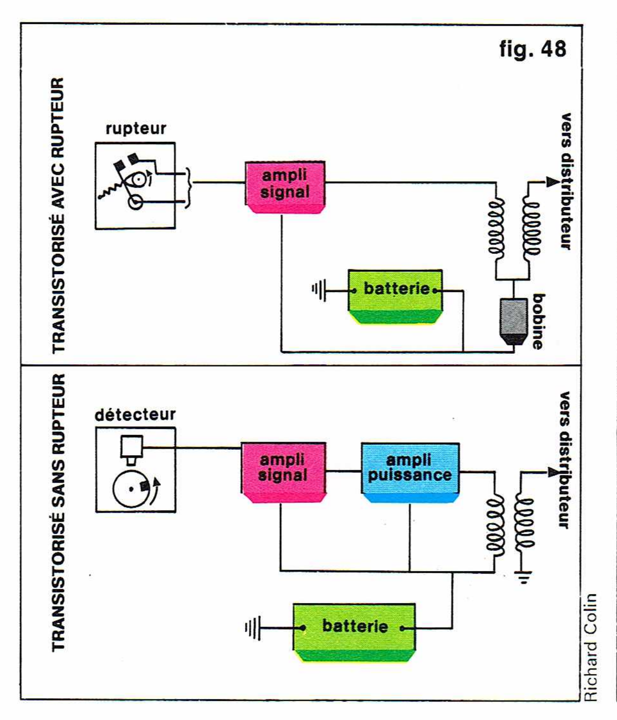
Dans l'*allumage par magnéto*, tous les organes de l'allumage par batterie, à l'exception de la bougie, sont regroupés en un seul appareil qui est entraîné par le moteur. L'énergie électrique est fournie par un générateur à aimant permanent (magnéto-génératrice). Ce système d'allumage est plus coûteux à l'achat et à l'entretien que le système d'allumage par batterie. Il présente aussi l'inconvénient de ne délivrer au démarrage qu'un courant de faible intensité, ce qui ne favorise pas l'allumage du moteur. Son seul avantage réside dans le fait qu'il n'a pas besoin de batterie pour fonctionner. Il n'est donc utilisé pratiquement que sur les moteurs de motocyclettes de petite et moyenne cylindrées couplé avec un volant d'inertie. Il est désigné dans ce cas par l'expression de *volant magnétique* (*fig.* 48).

Les systèmes d'*allumage électronique* visent à augmenter la puissance de l'étincelle d'allumage. Les principaux éléments de l'allumage par batterie sont conservés. Dans certains systèmes, allumage dit transistorisé, on simplifie le travail du rupteur en amplifiant l'impulsion qu'il donne, et c'est un transistor qui commande la bobine. Dans certains dispositifs, le rupteur mécanique est lui-même remplacé par un système de synchronisation magnétique ou optique commandé par le vilebrequin qui délivre un signal qui est amplifié par des circuits semi-conducteurs. Tous ces systèmes ont l'avantage de faciliter les démarrages à froid et les marches à haut régime. Ils sont malheureusement d'un prix élevé, ce qui limite

▼ *Carburateur Solex double corps ; les carburateurs modernes ont été dotés de dispositifs intégrés qui les rendent plus complexes.*



I.G.D.A. - Rizzi



leur développement. Ils s'imposent sur les moteurs poussés (vitesse supérieure à 10 000 t/mn).

* *Fonctions auxiliaires*

A côté de ces fonctions principales que sont la carburation et l'allumage, le fonctionnement d'un moteur exige que soient remplies les fonctions auxiliaires suivantes.

— Démarrage : il est assuré très généralement par un moteur électrique de lancement, alimenté en continu par la batterie. Les moteurs de faible puissance peuvent être lancés manuellement.

— Graissage : il s'effectue sous pression à l'aide d'une pompe volumétrique attelée qui aspire l'huile dans le carter.

— Refroidissement : il doit maintenir les parties sensibles du moteur en dessous de la température de tenue de l'huile de graissage (200 °C max.). Il peut s'effectuer à l'air (petites cylindrées et moteurs d'avion) ou à l'eau.

— Échappement : un collecteur d'échappement est nécessaire pour faciliter la détente des gaz de combustion à la fin du temps d'échappement. Ce collecteur comporte un silencieux pour diminuer le bruit d'échappement du moteur.

* *Domaines d'utilisation du moteur à explosion*

Depuis sa relève par la turbine à gaz dans le transport aérien, le moteur à explosion est surtout utilisé dans les transports terrestres et la propulsion des embarcations. Ses qualités, parmi lesquelles il faut citer surtout sa légèreté (masse spécifique exprimée en kg/kW peu élevée), le destinent particulièrement à ces applications. Les gammes d'utilisation sont :

— monocylindres, généralement cycle 2 temps, pour les motocyclettes, petites embarcations et petits engins autonomes ;

— moteurs de 2 à 8 cylindres, cycle 4 temps, pour les automobiles, camions et embarcations.

Si l'on excepte certaines applications (voiture de course ou avion), la puissance des moteurs à explosion reste limitée, car ce type de moteur est vite concurrencé par le moteur Diesel dès que la puissance augmente et que la masse spécifique n'est plus un paramètre d'importance.

Il n'est pas besoin d'insister sur le succès du moteur à explosion pour la propulsion automobile. Le développement considérable de ce moyen de transport a aujourd'hui en raison de son succès même une contrepartie : la pollution atmosphérique des villes par les gaz d'échappement.

C'est donc le souci de faire des moteurs moins polluants qui va probablement être chez les constructeurs un des principaux facteurs d'évolution du moteur à explosion durant les prochaines décennies.

Moteurs Diesel

* *Description sommaire*

Le moteur Diesel fonctionne suivant un cycle à 4 temps ou à 2 temps comme le moteur à explosion avec pour différence essentielle le mode de déclenchement de la combustion. Le combustible est en effet pulvérisé, dans le cylindre en fin de course du piston (PMH), dans l'air comburant porté à une température élevée par une compression sensiblement adiabatique. Les particules de combustible s'échauffent progressivement au cours de leur trajet dans la chambre de combustion, et, lorsque les premières d'entre elles atteignent leur température d'inflammation, la combustion démarre spontanément. Un moteur Diesel ne comporte donc ni carburateur ni circuit d'allumage ; il a besoin en revanche d'un système d'injection.

* *Cycle théorique — Cycle réel*

Le cycle à 4 temps de Diesel (brevet déposé en 1892) est caractérisé par une combustion à pression constante (injection du combustible au PMH). Il peut se décrire ainsi (voir *fig.* 49) :

1.2 : aspiration à pression constante (p. atmosphérique) ;

2.3 : compression adiabatique avec en fin injection de combustible ;

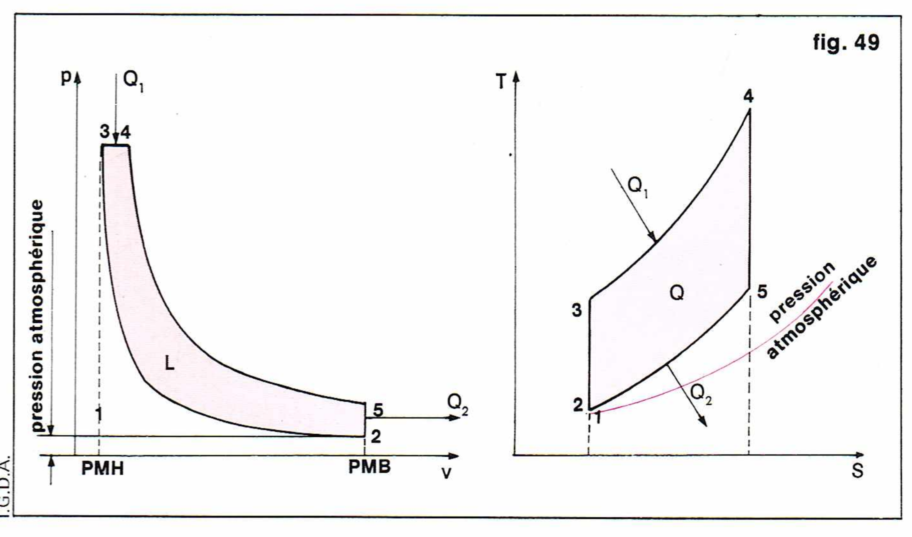
3.4.5 : combustion à pression constante et détente adiabatique ;

5.2.1 : mise à l'échappement du cylindre et évacuation.

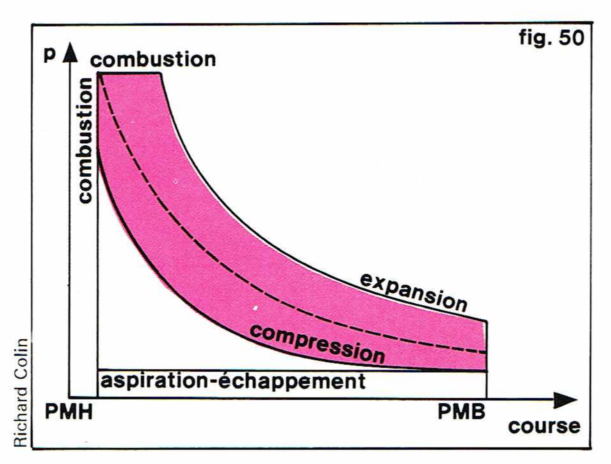
Le rendement thermodynamique de ce cycle augmente, comme celui du cycle Beau de Rochas, avec le taux de

▲ A gauche, figure 48 :* schéma de principe de l'allumage électronique. *A droite, figure 47 :* schéma du principe de l'allumage par batterie : *1, batterie ; 2, rupteur ; 3, distributeur ; 4, condensateur ; 5, bobine ; 6, interrupteur ; 7, ampèremètre.

***▼ Figure 49 :* cycle Diesel théorique.**



▶ *A gauche, figure 50 :* **cycle de Sabathé** *ou* **cycle mixte.** *A droite, figure 51 :* **comparaison entre les cycles Diesel théorique et réel.**



compression ; il diminue quand $\frac{v'}{v}$ augmente. En pratique, la combustion commence avant le PMH et on la décompose, pour les besoins du calcul, en deux parties : une à volume constant, une à pression constante. Le cycle ainsi obtenu (voir *fig.* 50) est appelé cycle de Sabathé ou cycle mixte. Il peut être considéré comme la réunion d'un cycle Beau de Rochas et d'un cycle Diesel accolés le long d'une adiabatique commune.

Le cycle réel d'un moteur Diesel (voir *fig.* 51) diffère du cycle théorique pour des raisons analogues à celles du moteur à explosion : laminage à l'aspiration et à l'échappement, compression et détente non rigoureusement adiabatiques. Pour obtenir une surface de cycle maximale, l'expérience montre que la régulation théorique doit être modifiée comme suit :

a) Début de l'injection ou « avance à l'injection »
b) Ouverture de l'échappement
c) Ouverture de l'aspiration } *croisement des*
d) Fermeture de l'échappement } *soupapes*
e) Fermeture de l'aspiration

* *Rendement — Bilan thermique*

On a déjà noté dans l'introduction que le rendement global des moteurs Diesel est élevé et sensiblement supérieur à ceux du moteur à explosion. Il varie entre 0,25 et 0,4. Ceci est dû aux températures plus élevées atteintes dans ce type de moteur. Ce rendement correspond à une consommation spécifique de 160 à 200 g/chl-h. Le bilan thermique (voir *fig.* 52) diffère donc légèrement de celui du moteur à explosion.

* *Facteurs de puissance*

Comme pour les moteurs à explosion, la puissance effective d'un moteur Diesel peut s'exprimer par la formule :

$$P = kD^2CNp_m$$

dans laquelle D est le diamètre du cylindre, C la course du piston, N la vitesse, p_m la pression moyenne définie comme pour le moteur à explosion et k un coefficient fonction des unités choisies et du nombre de cylindres.

L'alésage D peut être très grand, jusqu'à 1 m de diamètre, la course étant dans ce cas de 1,5 m à 1,8 m. Le rapport

▼ *Figure 52 :* **bilan thermique moyen d'un moteur Diesel.**

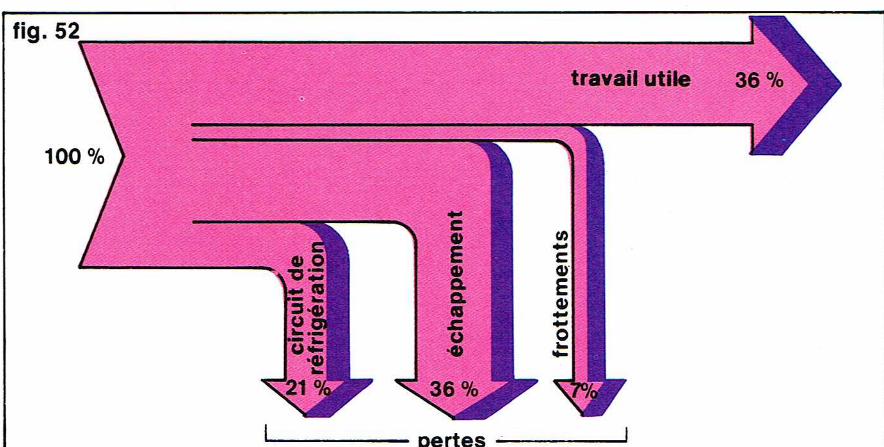


fig. 51
pressions
cycle théorique
cycle réel
A
injection
ouverture de la soupape d'échappement
échappement
C
press. atm
aspiration
D
volumes
PMH
PMB
I.G.D.A.

C/D est sur ces gros moteurs toujours supérieur à 1,5 et quelquefois plus grand que 2. Ces moteurs tournent à faible vitesse (100 à 300 t/mn) et on les appelle des *moteurs lents*. Par opposition, on trouve des moteurs dits *rapides* de plus petite cylindrée dont la vitesse varie entre 150 et 1 500 t/mn. Le poids étant approximativement proportionnel à la cylindrée (D^2C), la puissance massique est inversement proportionnelle à la vitesse. Augmenter la vitesse est donc le moyen le plus simple pour augmenter la puissance massique des moteurs.

La fatigue du moteur est fonction de la puissance moyenne p_m mais aussi de la pression maximale. On s'efforce d'augmenter la pression moyenne sans trop accroître la pression maximale : d'une part en se rapprochant du processus de combustion à pression constante, d'autre part en suralimentant le moteur comme on le verra plus loin.

* *Combustion*

Pour que la combustion se déclenche et se poursuive dans un cylindre de moteur Diesel, il faut que les deux conditions suivantes soient réalisées.

— Température de l'air supérieure à la température d'inflammation : pour des rapports volumétriques de compression de 15 environ, on peut atteindre en fin de compression une température de 500 à 600 °C alors que la température d'inflammation du gas-oil est de 350 °C environ.

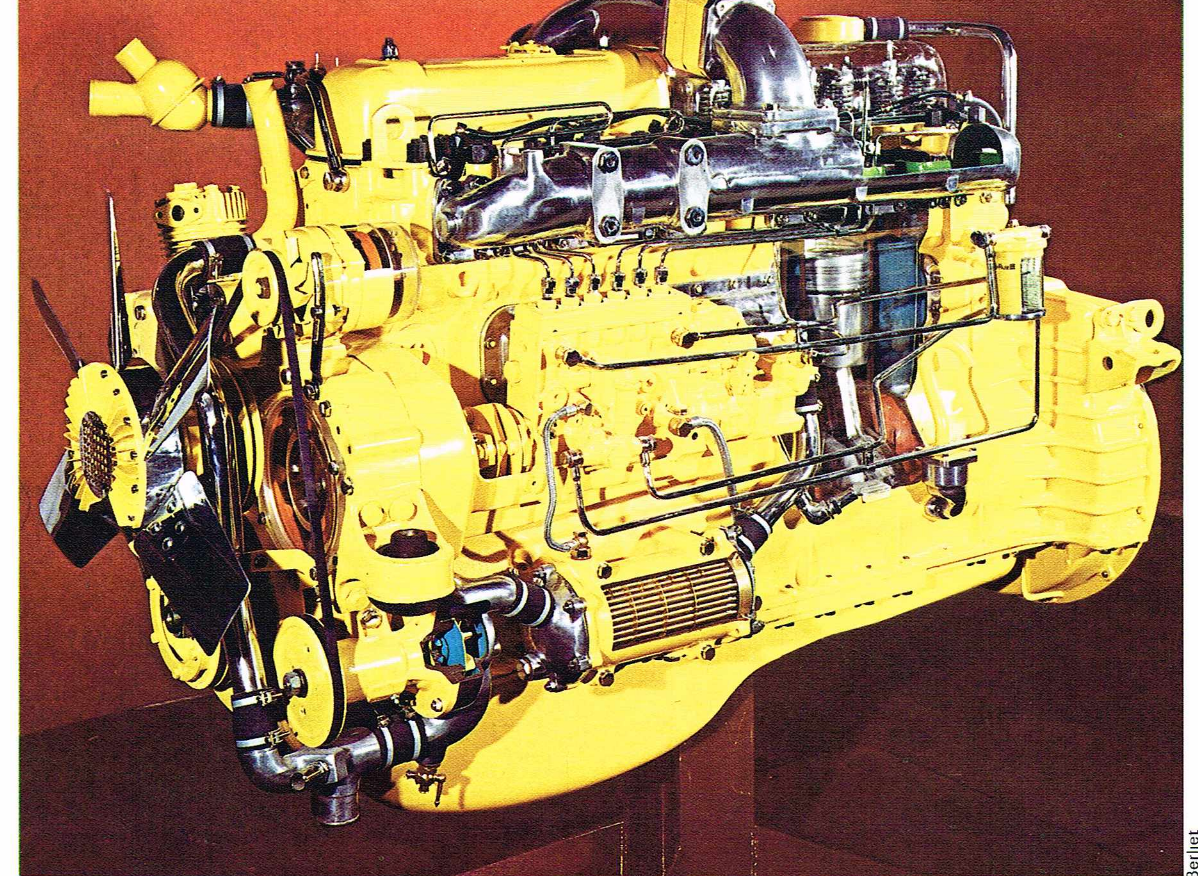
— Contact étroit entre combustible et carburant : après inflammation du combustible, l'air contenu dans la chambre de combustion s'appauvrit progressivement en oxygène et le combustible peut alors, sauf si certaines précautions sont prises, ne plus rencontrer l'oxygène nécessaire à sa combustion, en particulier au nez de l'injecteur. Ce risque est éliminé grâce à un excès d'air important et à la turbulence créée par l'expansion des gaz de combustion.

On distingue plusieurs phases successives dans la combustion (voir *fig.* 53) :

— un délai d'allumage entre le début de l'injection et le début de l'inflammation ;

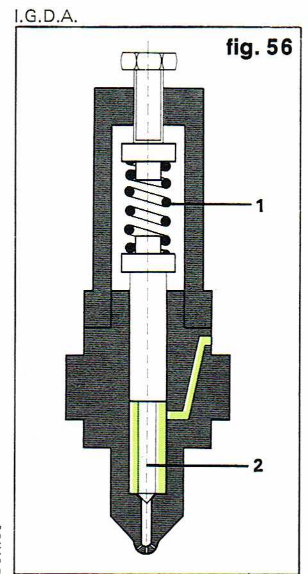
— une phase de combustion rapide du combustible déjà injecté au moment de l'inflammation, entraînant une élévation brutale de la pression qui est à l'origine des chocs sur l'embiellage (chocs Diesel) ;

— une période de combustion réglée par le débit de l'injecteur appelée période de combustion contrôlée, pendant laquelle le combustible s'enflamme au fur et à mesure de son introduction. La combustion devrait en principe se terminer en fin d'injection, mais elle se poursuit sur les moteurs rapides durant une fraction appréciable de la course de détente.



◀ *Moteur Diesel Berliet MDS 06.35.40, (6 cylindres, 265 ch) à aspiration atmosphérique.*

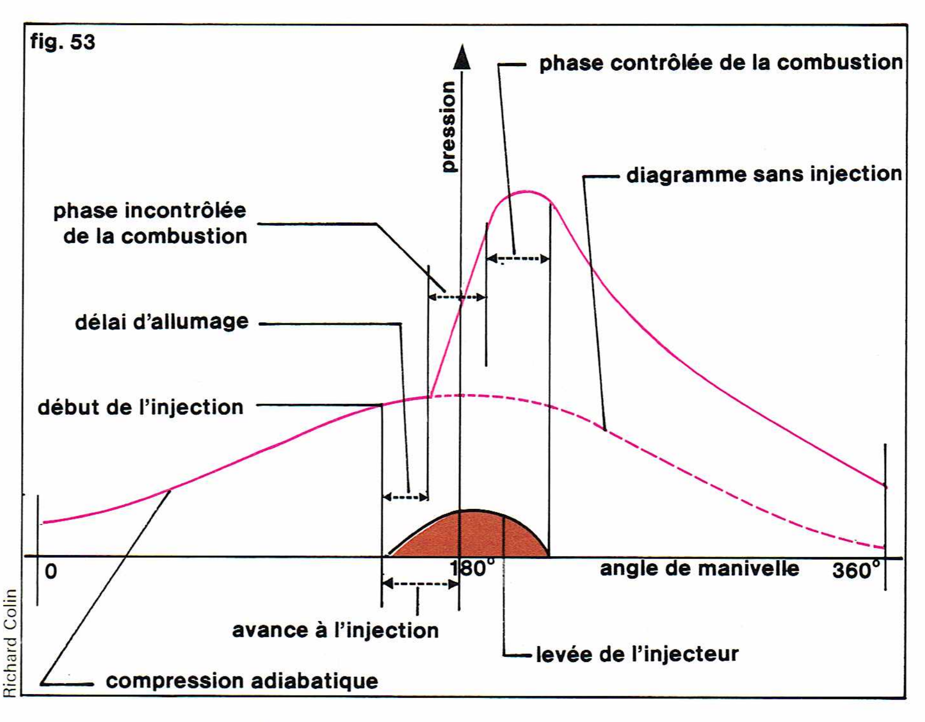
I.G.D.A.



Le délai d'inflammation est donc l'élément important des caractéristiques d'un combustible Diesel puisqu'il est à l'origine, s'il est trop important, du choc Diesel. On l'apprécie pour un combustible donné par l'*indice de cétène*. La méthode d'estimation est analogue à celle de l'indice d'octane pour la détonation des combustibles des moteurs à explosion. On attribue au cétène ($C_{16}H_{32}$), de faible délai, l'indice 100, et au méthyl-napthtalène ($C_{10}H_7CH_3$), à grand délai, l'indice 0. L'indice de cétène d'un combustible est déterminé, par comparaison avec le mélange des deux hydrocarbures de référence, comme le pourcentage en volume de cétène dans ce mélange qui donne le même délai d'allumage que le combustible donné. Cette mesure est effectuée sur un moteur standard. L'indice de cétène peut être amélioré par des additifs comme le nitrate d'éthyle ($NO_3C_2H_5$), qui ont une action inverse à celle des antidétonants. Incorporé dans le combustible, il réduit le délai d'allumage admis dans l'air et facilite le départ du moteur. Le nombre de cétène admissible varie de 40 sur les moteurs lents à 80 pour les moteurs rapides.

D'autres caractéristiques du combustible intéressent la combustion : la volatilité qui influe sur la rapidité de la combustion, la température d'inflammation, la viscosité qui doit en particulier être suffisante pour graisser les pompes d'injection, le pouvoir calorifique et le carbone résiduel. Il faut citer également la teneur en cendres et la teneur en soufre dont les effets nuisibles, si ces teneurs sont trop élevées, concernent surtout l'endurance du moteur.

Malgré toutes ces qualités requises pour le combustible, les moteurs Diesel peuvent brûler des produits d'origines très variées. En pratique, on ne brûle guère que les produits de distillation du pétrole brut désignés sous le terme générique de « gas-oil ».



▲ *Figure 56 ; injecteur pour injection mécanique : 1) ressort de tarage ; 2) aiguille. Figure 53 : phases de la combustion dans un moteur à cycle Diesel.*

* *Systèmes d'injection*

Le système d'injection du combustible doit :

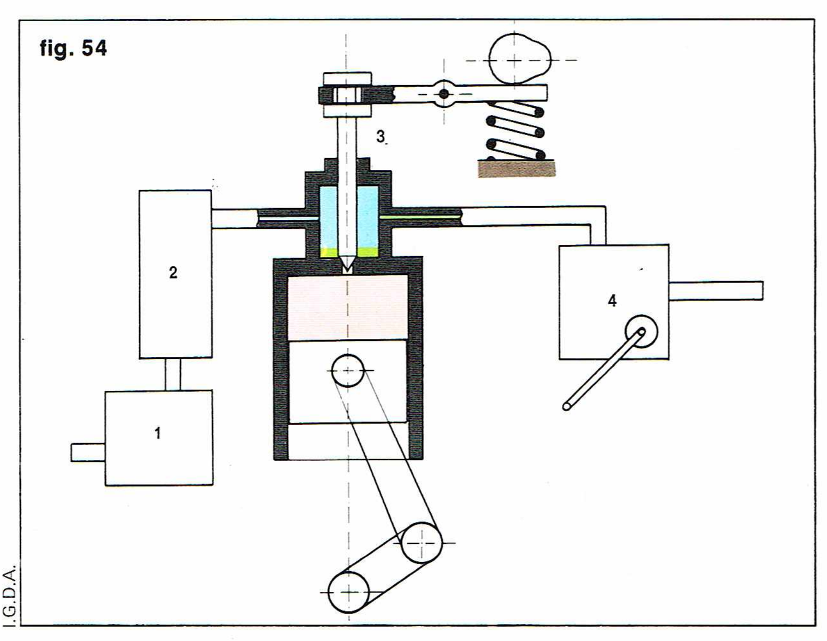
— introduire dans le cylindre pendant une période bien précise du cycle une quantité bien déterminée de combustible ;

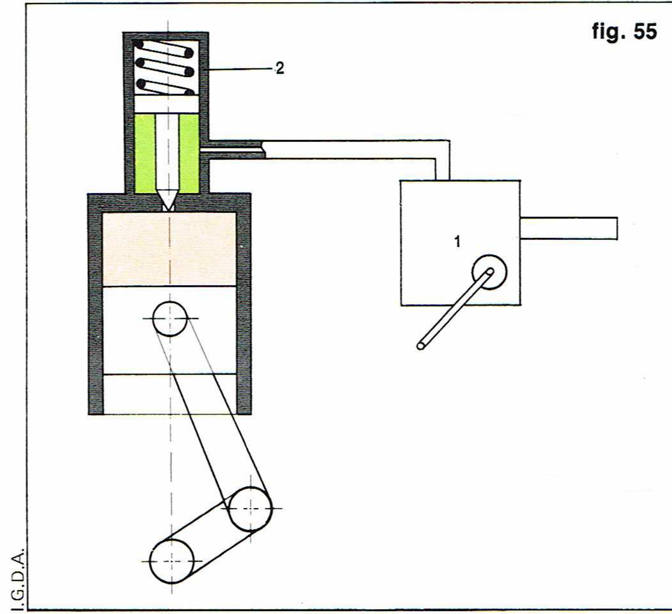
— assurer la pulvérisation convenable du combustible, celle-ci devant être d'autant plus fine que la vitesse du moteur est élevée et que son alésage est petit.

Par pulvérisation fine on entend une division du combustible en gouttelettes suffisamment fines, ce qui réduit le délai d'inflammation. Ce diamètre varie de une à plusieurs dizaines de microns suivant le procédé d'injection employé. Il faut également que la pénétration du jet de combustible dans l'air sous pression soit suffisante pour assurer un bon mélange entre les deux. Cette pénétration est directement fonction de l'énergie mise en jeu dans le système d'injection. Cette énergie est fournie soit par de l'air comprimé dans les moteurs à insufflation, soit par des pompes dans les moteurs à injection. On distingue donc deux procédés d'injection : l'*injection pneumatique* et l'*injection mécanique.*

Dans l'*injection pneumatique* (voir *fig.* 54), le combustible est dosé par une pompe à piston et refoulé dans l'injecteur qui le pulvérise dans le cylindre à l'aide d'air sous pression de 60 à 80 bars. Dans l'*injection mécanique* (*fig.* 55), le dosage et la pulvérisation du combustible sont assurés par une pompe qui refoule le combustible sous une forte pression (300 à 800 bars) dans l'injecteur.

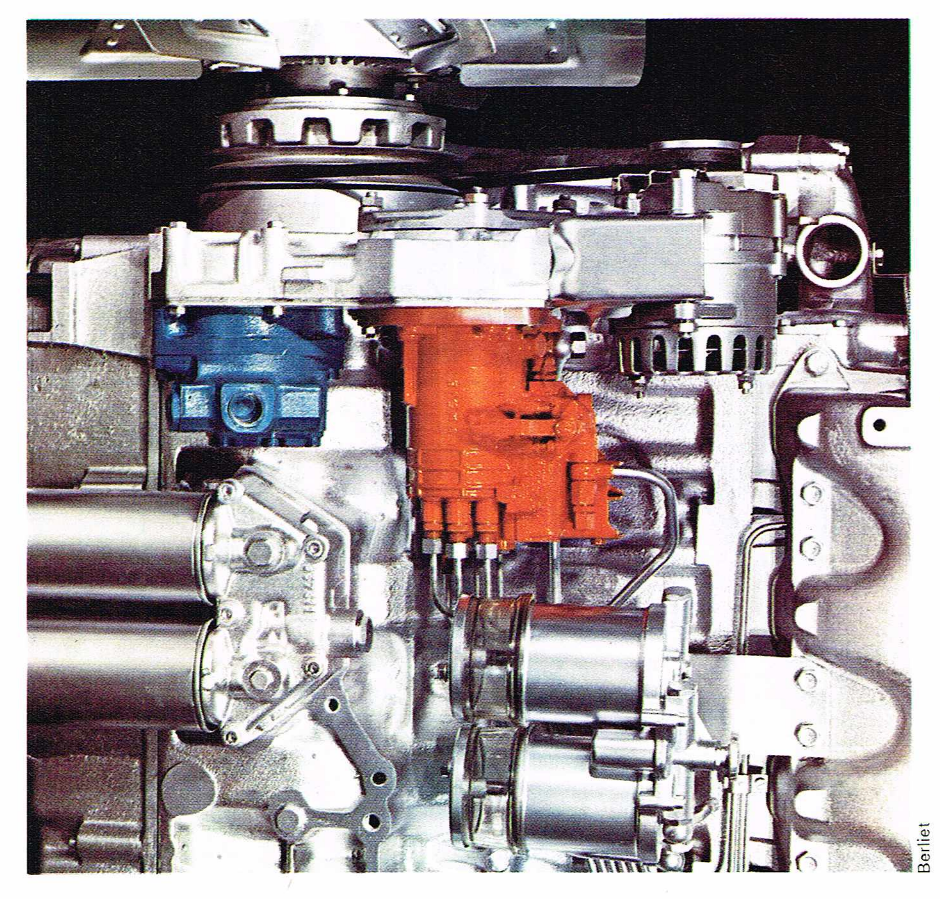
Chaque procédé a ses avantages et ses inconvénients. L'injection pneumatique consomme beaucoup plus d'énergie que l'injection mécanique mais donne une pulvérisation bien supérieure. Ce procédé a été utilisé en règle générale sur les premières générations de moteurs Diesel. Il est resté en usage ensuite sur des moteurs lents de forte puissance. Aujourd'hui on peut dire que l'injection mécanique est généralisée.





▲ *Figure 54; schéma de l'injection pneumatique du combustible : 1, compresseur; 2, bonbonne d'air sous pression; 3, injecteur; 4, pompe. Figure 55; schéma de l'injection mécanique : 1, pompe; 2, injecteur.*

▼ *Pompe à injection rotative du moteur Diesel Berliet MID 06.20.30 (6 cylindres, 185 ch).*



* *Injecteurs*

L'injecteur doit assurer :

— la pulvérisation,

— la répartition du jet de combustible dans la chambre.

Cette double fonction est assurée par une *buse* comportant un ou plusieurs orifices calibrés débouchant dans le cylindre. Divers modèles d'injecteurs ont été imaginés mais avec la généralisation de l'injection mécanique, le type d'injecteur fermé par aiguille (voir *fig.* 56) s'est imposé. Le principe en est simple : l'aiguille-pointeau qui ferme l'orifice de pulvérisation est commandée hydrauliquement par le combustible lui-même. Cette aiguille s'ouvre lorsque la pression de refoulement de la pompe à combustible qui s'applique dans la chambre permet de contrebalancer l'effort d'un ressort de tarage. Cette pression d'ouverture est de 200 bars environ, l'aiguille se ferme sensiblement à la même pression. On évite par cette aiguille la mauvaise pulvérisation qui se produirait en début et en fin d'injection par insuffisance de pression. Il faut noter qu'entre ces deux valeurs des pressions d'ouverture et de fermeture, la pression est réglée par la pompe d'injection, et elle atteint des valeurs notablement supérieures à la pression d'ouverture de l'aiguille. On trouve des injecteurs à trou unique ou à trous multiples.

Les trois parties essentielles de l'injecteur sont donc la *buse* qui porte le siège de l'aiguille et les orifices de pulvérisation, l'*aiguille* qui est responsable de l'étanchéité vers le cylindre et vers l'extérieur, et le *ressort de tarage*. Du fait de leur situation, les injecteurs risquent de subir des échauffements préjudiciables à leur fonctionnement : vaporisation du combustible, coincement de l'aiguille, obstruction des orifices de la buse. Il y a donc nécessité de réfrigération. Celle-ci peut être assurée par le combustible lui-même qui traverse l'injecteur, à condition que son débit soit suffisant. Cette condition est remplie sur les moteurs qui ont une forte puissance massique, c'est-à-dire les moteurs rapides. Sur les moteurs lents, cette réfrigération est assurée par un circuit d'eau ou de combustible, et effectuée au plus près de la buse.

* *Pompes à combustible*

Le rôle de cette pompe est d'introduire la quantité convenable de combustible à point nommé, c'est-à-dire d'effectuer le *dosage*.

Les solutions les plus répandues associent une pompe à chaque cylindre, celle-ci étant reliée à l'injecteur par une tuyauterie.

Les pompes sont toujours du type « piston plongeur ». Leur course est synchronisée avec celle du piston moteur concerné. Il y aura une course de refoulement tous les 2 tours pour les moteurs 4 temps, tous les tours pour les 2 temps.

La loi de débit d'injection est fixée par des dispositions constructives, tel un profil de came. Des dispositifs permettent de régler en marche l'avance à l'injection et la quantité de combustible injectée à chaque cycle. Ces réglages peuvent être effectués soit par action directe sur le débit, soit par variation de la course du piston plongeur. On trouvera sur la *figure* 57 le schéma d'une pompe à réglage par excès de débit.

Les conditions de fonctionnement des pompes à combustible de moteur Diesel sont particulièrement dures. Sous une pression élevée (pouvant atteindre 500 bars), elles doivent refouler du combustible en quantité pouvant être très faible avec cependant une bonne précision de dosage. Ces pompes n'ont généralement pas de presse-étoupe, et l'étanchéité entre le piston et son fourreau est assurée par un jeu très faible qui nécessite une grande qualité d'usinage : rectification suivie d'un rodage. L'ensemble piston-fourreau constitue alors un ensemble indissociable sans interchangeabilité possible des éléments.

La tuyauterie de liaison entre la pompe et l'injecteur joue un rôle important par sa longueur, car cette tuyauterie peut être le siège de phénomènes hydrauliques complexes. Certains constructeurs ont regroupé les deux appareils en un seul organe, appelé *injecteur-pompe*, actionné par une came avec ou sans culbuteurs.

* *Chambres de combustion*

La chambre de combustion est le volume délimité par le cylindre, la culasse et le piston, et dans lequel se déroule la combustion. La répartition globale du combustible dans l'air dépend de la forme de la chambre de combustion. Le problème à résoudre est de permettre aux dernières fractions de combustible injectées de trouver l'oxygène nécessaire à leur combustion. C'est par un brassage énergique de la masse gazeuse en cours de combustion que l'on essayera d'atteindre ce but.

Il s'agit donc de créer des conditions de turbulence. Les solutions techniques se résument à deux grandes catégories.

— Les *moteurs à injection directe*. La chambre de combustion n'a aucune particularité (turbulence naturelle) ou comporte des dispositions constructives simples telles que le creusement de la tête du piston ou la disposition dissymétrique des soupapes (turbulence activité). Les premières chambres conviennent bien aux moteurs lents à 2 temps, les deuxièmes aux moteurs 4 temps semi-rapides.

— Les *moteurs à chambre de précombustion*. Sur ces moteurs, la chambre de combustion est divisée en deux parties de volume inégal séparées par un étranglement. L'injection s'effectue dans la plus petite partie (1/3 du volume total) ou antichambre qui communique avec le cylindre par une ou plusieurs tuyères. Des inflammations du combustible dans l'antichambre, l'ensemble de la masse gazeuse s'écoule violemment dans la partie principale de la chambre par les tuyères, ce qui provoque la turbulence souhaitée. Sur certains moteurs, l'antichambre peut être relativement très grande par rapport au volume de haut de cylindre et constitue une véritable chambre de précombustion. Ces dispositions conviennent particulièrement aux moteurs rapides (*fig.* 58).

* *Alimentation en air et expulsion des gaz brûlés*

Sur les moteurs 4 temps, la distribution se fait, comme sur les moteurs 4 temps à explosion, par des soupapes. Le cycle 4 temps permet un bon remplissage des cylindres et il est donc possible d'obtenir des puissances moyennes relativement élevées. Sur les moteurs 2 temps, on a vu qu'un balayage du cylindre était nécessaire, et, sur les moteurs à explosion, le balayage est réalisé par le carter mais cette solution reste limitée à des petits moteurs, monocylindrés en général (*fig.* 59).

La raison en est simple : il y a perte de combustible pendant le balayage puisque celui-ci est effectué avec le mélange carburé. Dans le cas du moteur Diesel, le balayage se faisant avec de l'air pur, il n'y a aucun inconvénient et c'est même un avantage de laisser partir une fraction de l'air avec les gaz d'échappement.

Pour produire l'air de balayage, on utilise une pompe de type volumétrique ou une soufflante. La pompe volumétrique peut être indépendante ou attelée au moteur. La soufflante, étant donné sa vitesse optimale, est généralement indépendante et entraînée par un moteur électrique.

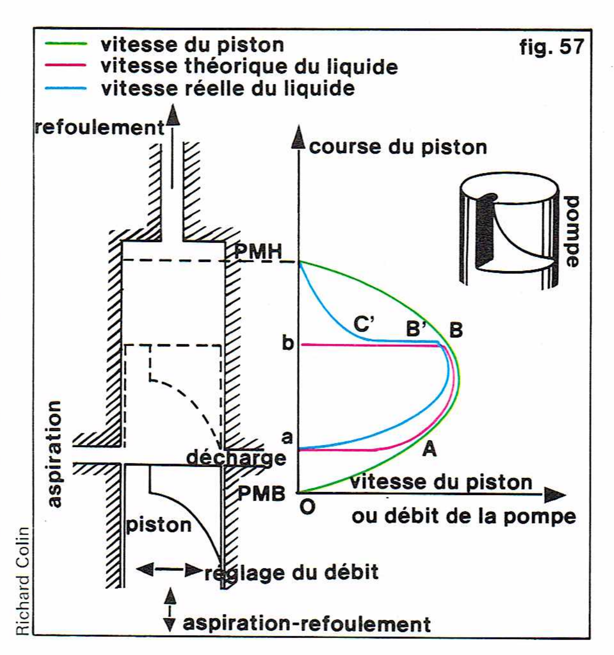
L'air de balayage est canalisé par un collecteur qui dessert les cylindres. Le principe de balayage, opération qui, rappelons-le, combine dans un même temps la chasse des gaz brûlés et l'admission d'air frais, est réalisé par les constructeurs :

— entièrement par lumières (admission et échappement) : on réalise ainsi un balayage transversal appelé aussi balayage « en boucle » ;

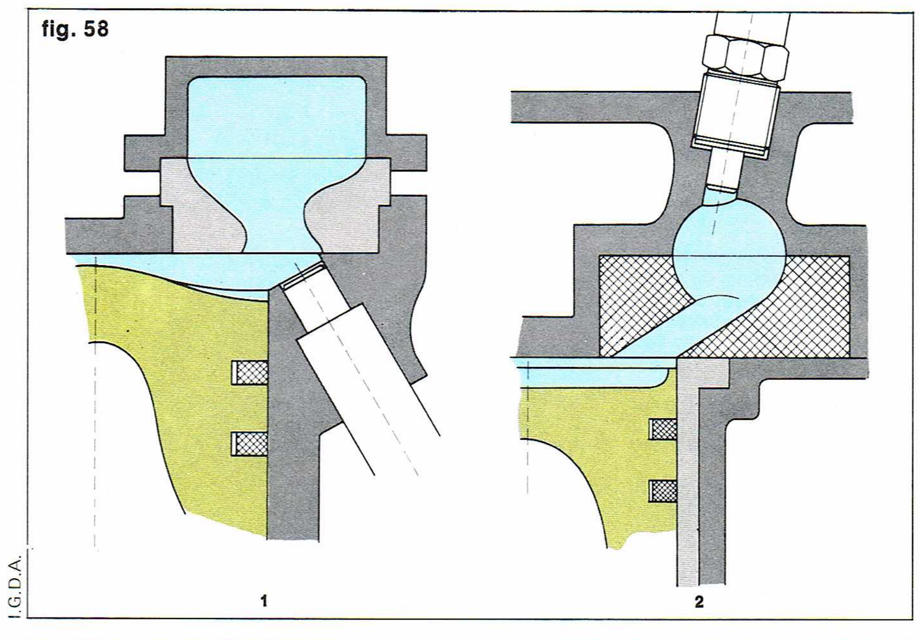
— par une combinaison de lumières et de soupapes : l'admission se fait par lumière et l'échappement par soupapes ou inversement ; c'est le balayage « équicourant ».

* *Suralimentation*

Le principe de la suralimentation est simple. Pour brûler plus de combustible dans un cylindre, il faut y introduire davantage d'air. Ceci peut se faire simplement en remplaçant l'admission d'air atmosphérique par une admission d'air sous pression. Si la pression de cet air est de *n* fois la pression atmosphérique, on pourra alors brûler *n* fois plus de combustible par cycle. Il va de soi que le rapport volumétrique de compression du moteur devra être réduit si on ne veut pas atteindre une pression

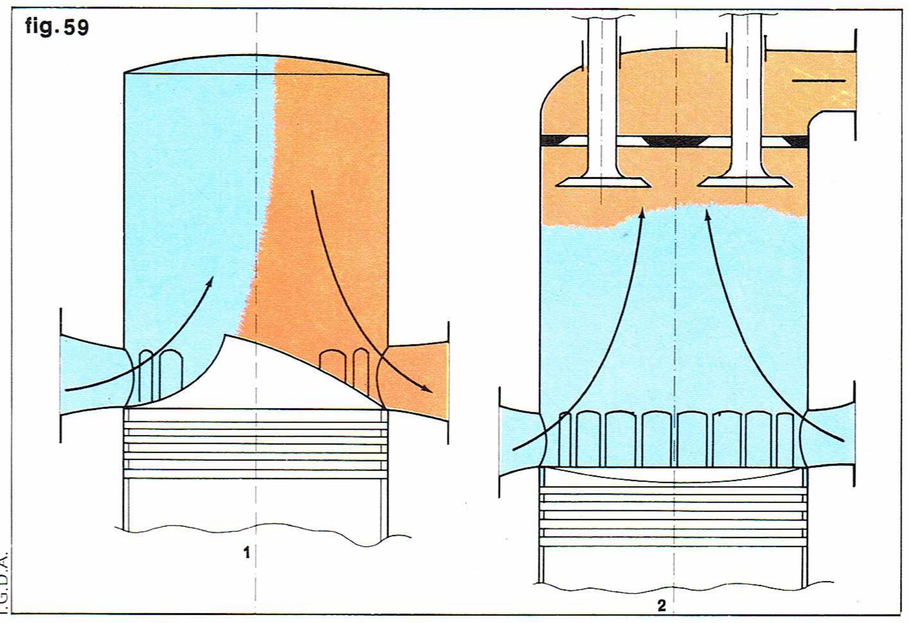


◄ *Figure 57 : pompe à réglage par excès de débit et courbe de débit en fonction de la course du piston.*



▼ *Figure 58 : injection en chambre de précompression (1) et en chambre de précombustion (2).*

Figure 59 : deux types de balayage d'un moteur Diesel 2 temps : 1, par piston profilé ; 2, équicourant, par lumière et soupape.



mid 06.20.30

berliet moteur 6 cyl.



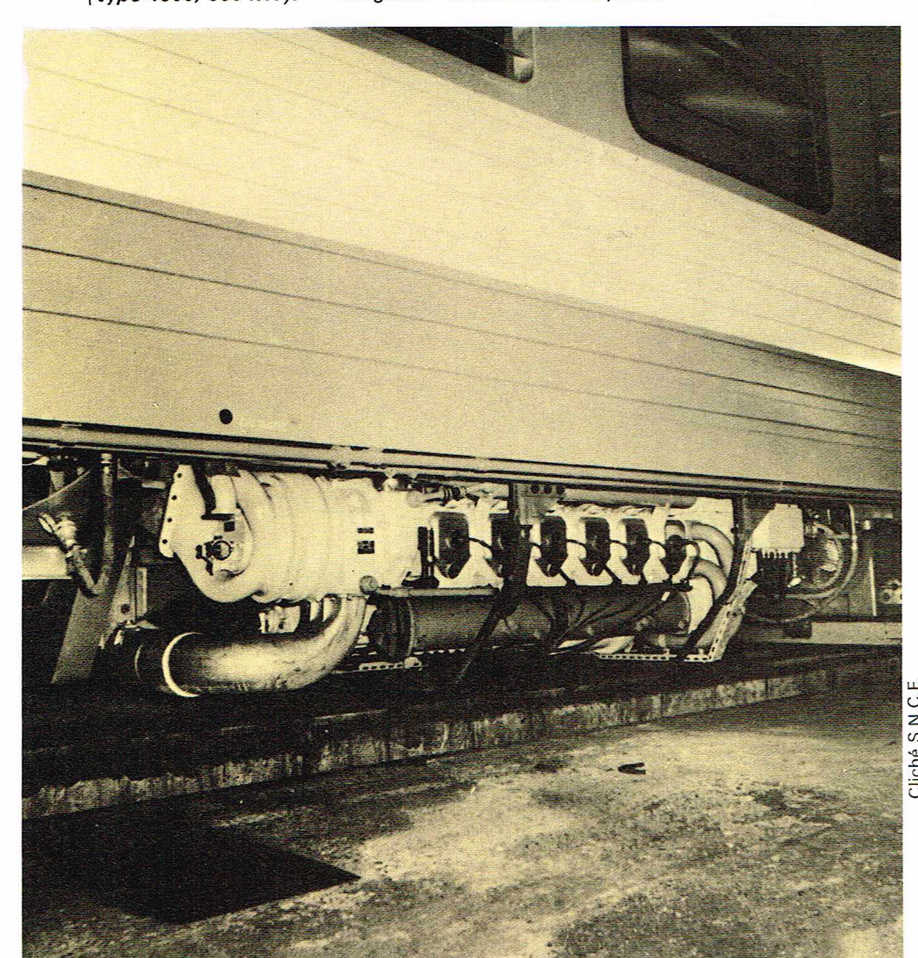
Berliet

▲ *Moteur Diesel MIDS 06.20.30 (6 cylindres, 215 ch) version suralimentée par turbo.*

▼ *Moteur Diesel à plat monté sur autorail (type 4500, 330 kW).*

trop forte en fin de compression. Ce faisant, on réduira aussi la température en fin de combustion, ce qui diminuera le rendement thermique théorique du cycle. Il y a donc un optimal à la suralimentation.

On peut aussi limiter la pression en retardant la fermeture de la soupape d'échappement (augmentation du temps de croisement des soupapes), ce qui permet d'effectuer un très bon remplissage du cylindre, tout en réfrigérant notablement les parois.



Cliché S.N.C.F.

En dépit des réserves sur les rendements, les avantages de la suralimentation sont réels : gain sur la puissance massique et diminution de la consommation aux fortes charges. Il est possible par ailleurs de limiter les conséquences de la suralimentation sur l'endurance du moteur. Pour toutes ces raisons, la suralimentation des moteurs, tant 4 temps que 2 temps, s'est considérablement développée.

L'air de suralimentation est produit par une soufflante de type volumétrique. Une autre solution, très répandue, est de produire cet air par une soufflante entraînée par une turbine à gaz fonctionnant sur les gaz d'échappement du moteur.

* *Fonctions auxiliaires*

Ce sont les mêmes que celles du moteur à explosion : démarrage, graissage, refroidissement et échappement.

A noter cependant que, pour le démarrage, le moteur ne peut fonctionner que si la température en fin de compression dépasse la température d'inflammation du combustible. Il faudra donc prévoir un système de démarrage suffisamment puissant, capable de lancer le moteur à une vitesse de l'ordre de 25 % de sa vitesse normale. Sur certains moteurs, munis d'une préchambre, on prévoit dans cette dernière une bougie de démarrage.

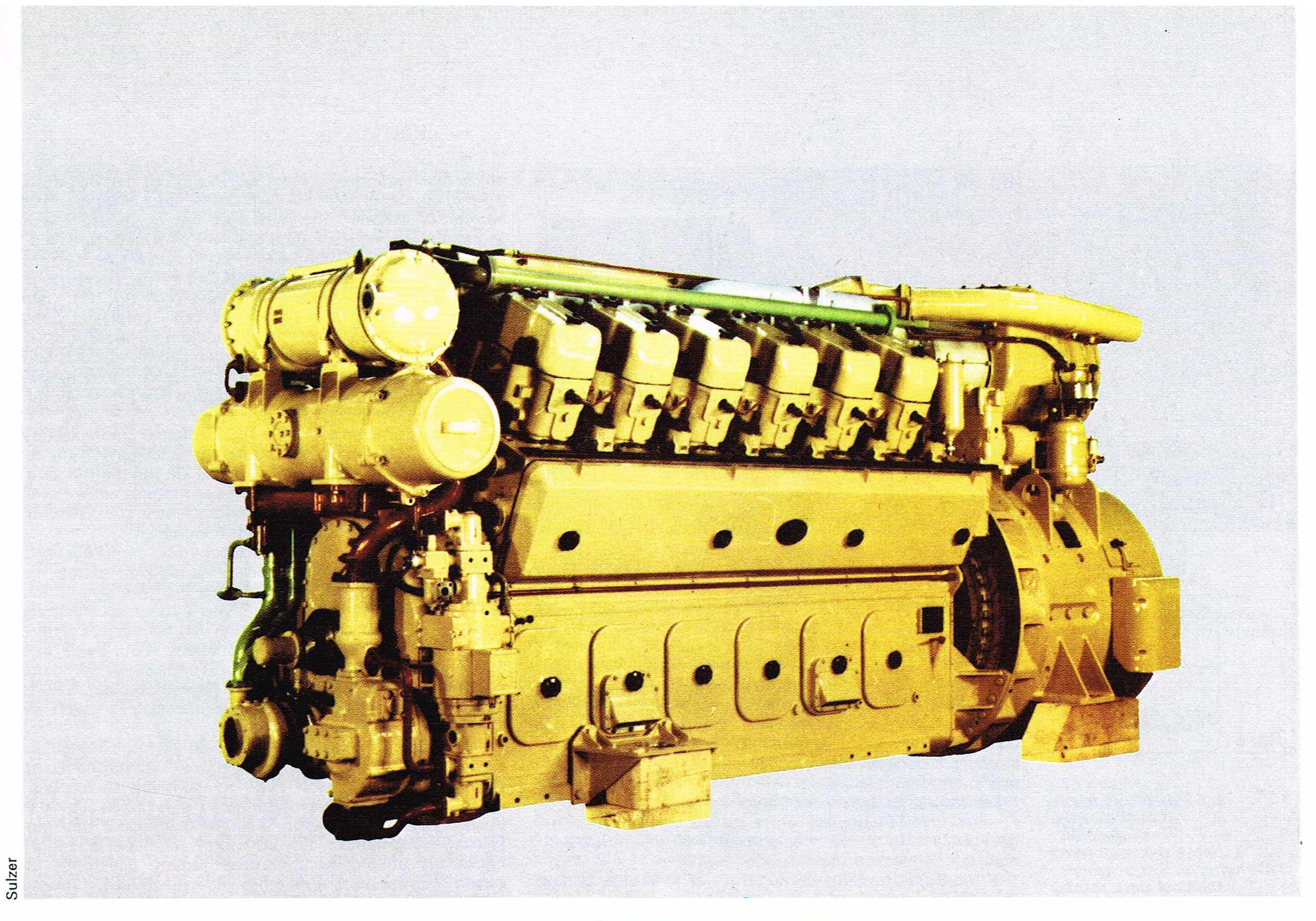
Le refroidissement peut sur certains moteurs poser des problèmes particuliers : on peut citer pour exemple la réfrigération des fonds de piston qui exige des dispositifs complexes pour faire circuler le liquide réfrigérant dans le piston, compte tenu de son mouvement périodique alternatif.

* *Domaines d'utilisation des moteurs Diesel*

Ils sont nombreux et variés, compte tenu des qualités de ce type de moteur.

La gamme de puissance est très étendue et va de quelques chevaux à plus de 30 000 ch ; les modèles les plus utilisés se situent entre 10 et 200 ch. Les moteurs de grande puissance sont en général des moteurs lents dont la vitesse varie entre 100 et 200 t/mn. On distingue ensuite des moteurs semi-rapides (200 à 600 t/mn) dont la puissance est encore élevée et des moteurs rapides (600 à 1 500 t/mn) dont la puissance ne dépasse guère 6 000 ch.

Les applications sont nombreuses. Les moteurs Diesel sont utilisés comme moteurs stationnaires pour



Sulzer

▲ ***Moteur Diesel utilisé pour la traction sur rail.***

la production d'électricité et la commande de machines diverses. Ils sont très utilisés en propulsion marine, tant civile que militaire. Ces moteurs sont soit du type lent à attaque directe de l'hélice, soit du type rapide dans la solution diesel-électrique. Comme moteur de propulsion, ils sont encore très utilisés dans les transports routiers et la traction sur rail dans la solution diesel-électrique. Pour des raisons de puissance massique trop peu élevée, le moteur Diesel n'a pratiquement pas pénétré le transport aérien.

Technologie des moteurs thermiques alternatifs

La partie centrale des machines alternatives est constituée par l'ensemble « piston-bielle-manivelle ». C'est le piston en effet qui recueille l'énergie mécanique contenue dans le fluide de travail pour la transmettre à l'arbre moteur par le système bielle-manivelle qu'on appelle souvent « attelage ». L'analogie est frappante : on relie les pistons à l'arbre manivelle de la même façon que les chevaux (moteurs) sont reliés au véhicule (récepteur).

La fonction de ce trio d'organes mécaniques dépasse le domaine des seuls moteurs à combustion interne, et un certain nombre de dispositions techniques citées ci-après concernent les machines alternatives à vapeur, qui seront décrites plus loin. Elles concerneraient tout aussi bien d'autres machines alternatives comme les récepteurs : compresseurs et pompes. Dans ce cas, le système fonctionne à l'inverse, en général en transformateur d'énergie : l'énergie mécanique de l'arbre en mouvement sert, dans un compresseur, à comprimer un fluide.

* *Piston*

Le piston, paroi mobile de la chambre de combustion, reçoit la poussée des gaz enflammés et assure les fonctions suivantes :

— transmission des effets de détente (travail +) et de détente (travail —) à l'arbre moteur par le système bielle-manivelle ;

— évacuation des calories non transformées en travail qu'il reçoit ;

— transmission des réactions latérales sur la chemise.

Le piston peut, de plus, sur les moteurs 2 temps jouer le rôle de distributeur d'air de balayage et de gaz brûlés.

Le piston est donc soumis, d'une part, à des contraintes d'origine thermique et, d'autre part, à des contraintes mécaniques sous l'effet de la pression de combustion et des forces d'inertie ; ces dernières croissent rapidement avec l'alésage et la vitesse de rotation du moteur. Sous ces diverses sollicitations, les déformations du piston doivent rester limitées, ainsi que sa température, pour que l'étanchéité et le graissage soient convenablement assurés. On demande donc à un piston trois qualités difficilement conciliables : rigidité, légèreté et précision.

I.G.D.A. - Rizzi

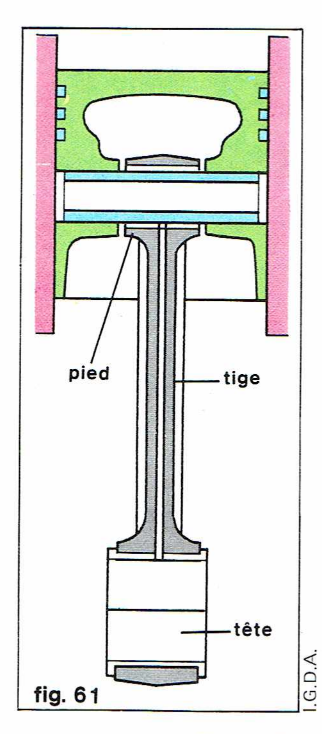
◀ ***Un piston doit présenter trois qualités difficilement conciliables : rigidité, légèreté et précision.***

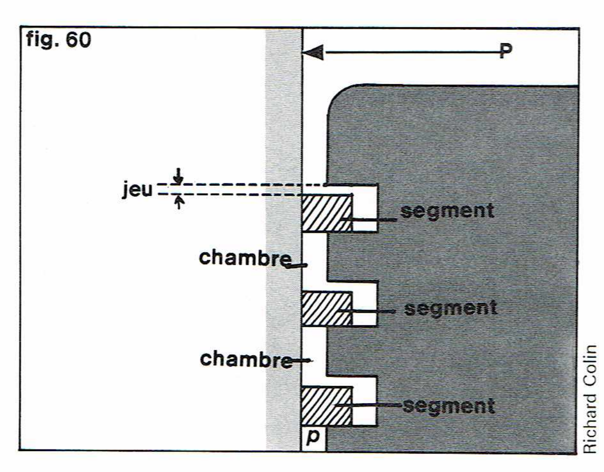
On distingue sur un piston deux parties :

— un fond, appelé aussi « tête » de piston, qui porte généralement les segments d'étanchéité ;

— un fourreau ou jupe.

Pour les petites cylindrées, le piston est généralement monobloc et réalisé en alliage léger ou en fonte résistants. Les alliages d'aluminium se sont généralisés sur les moteurs à explosion. Dans les grosses cylindrées, le piston est





▲ *Figure 61 : schéma d'une bielle d'automobile.*
Figure 60 : schéma des segments d'étanchéité. Ces segments réalisent un « joint à labyrinthe » utilisant les détentes dans des chambres successives pour diminuer le débit de fuite. Si on a n segments, la charge motrice du débit de fuite passe approximativement de $\underline{P} - p$ ***à*** $\frac{P - p}{n}$.

toujours en deux parties : le fond en acier, la jupe en fonte pour améliorer le glissement.

Les pressions maximales étant plus élevées sur les moteurs Diesel que sur les moteurs à explosion, les fonds de piston sont habituellement plus épais et les jupes plus longues sur des moteurs comparables. La jupe plus longue permet de limiter la pression d'appui sur la chemise, ce qui est favorable au graissage. Sur les gros moteurs, l'attelage est souvent réalisé avec des glissières pour supprimer la réaction latérale. La face supérieure des pistons des moteurs Diesel est souvent complexe pour provoquer le phénomène de turbulence.

Les segments ont un double rôle :

— assurer l'étanchéité entre piston et chemise aussi bien pendant la détente des gaz de combustion que pendant la compression de l'air frais ;

— contrôler le débit de remontée d'huile vers le haut du cylindre.

Dans leur rôle d'étanchéité les segments réalisent une sorte de joint à labyrinthes (on appelle ainsi une succession de chambres de détente). Pour les moteurs de faible puissance, les moteurs à explosion ont, en général, deux à trois segments ; les moteurs Diesel trois à quatre. Les moteurs Diesel de forte puissance ont de quatre à huit segments, leur nombre étant d'autant plus élevé que l'alésage est grand. L'étanchéité n'est assurée que s'il y a appui des segments, sous la pression des gaz, sur la gorge d'une part, et la chemise d'autre part (voir *fig.* 60). Cela suppose que ces segments conservent leurs jeux dans toutes les conditions de fonctionnement du moteur. Il ne faut pas, de plus, que la mobilité des segments dans leur gorge soit entravée par des dépôts de résidus de combustion. C'est ce phénomène de bloquage des segments qui est appelé « gommage ».

Les segments doivent présenter un faible coefficient de frottement ; leurs caractéristiques métalliques doivent de plus rester stables aux températures de fonctionnement. Le matériau utilisé dans la plupart des moteurs est la fonte, en raison de son aptitude au frottement à sec. C'est de plus un matériau stable et à bon marché.

Le raclage de l'huile est assuré par un ou deux segments disposés à la partie inférieure de la jupe du piston. Le vilebrequin projette une importante quantité d'huile sur les chemises. Cette huile, qui n'a pas le temps de s'écouler vers le carter, a tendance à remonter vers le haut du cylindre sous l'action des segments d'étanchéité. Pour éviter une consommation excessive d'huile, l'importance de cette remontée d'huile est limitée par le segment racleur. L'huile ramassée par le segment est évacuée vers le carter au travers de la paroi du piston.

La chaleur absorbée par le fond du piston est évacuée par sa jupe vers le fond du cylindre. Les segments ne jouent aucun rôle dans cette transmission de chaleur, étant donné le caractère intermittent de leur contact avec le piston. Cette réfrigération devient insuffisante dès que l'alésage augmente (d = 200 mm), et il devient alors nécessaire de prévoir un refroidissement des fonds de piston. Les moteurs concernés, compte tenu du niveau de puissance, sont des moteurs Diesel. La réfrigération est assurée par un circuit d'huile pris en dérivation sur le circuit de graissage.

Sur certains gros moteurs marins, le refroidissement est assuré par un circuit d'eau douce.

* *Bielle*

Dans les machines alternatives la bielle est une pièce de liaison entre le piston, d'une part, et la manivelle, d'autre part. Elle transforme un mouvement rectiligne alternatif en un mouvement circulaire continu dans le cas des moteurs ; elle est chargée de la transformation inverse dans le cas des machines réceptrices comme les pompes et les compresseurs.

La bielle se compose essentiellement (*fig.* 61) :

— d'un corps monobloc ou en deux parties,

— d'un logement de coussinet aux deux extrémités.

L'assemblage du côté du piston est appelé « pied de bielle », celui du côté de la manivelle « tête de bielle ». Au point mort haut (PMH) et au point mort bas (PMB), bielle et manivelle sont alignées, faisant un angle de 180° dans le premier cas et un angle de 0° dans le second cas. Le rapport entre longueur de bielle et rayon de manivelle est en général compris entre 4 et 6. Plus ce rapport est élevé, plus l'effort latéral est faible et la transmission de l'effort facilitée. Sur les gros moteurs, on reprend cet effort latéral par un système de crosse coulissant dans des glissières (voir *fig.* 62). Cette disposition s'impose dans les moteurs à double effet.

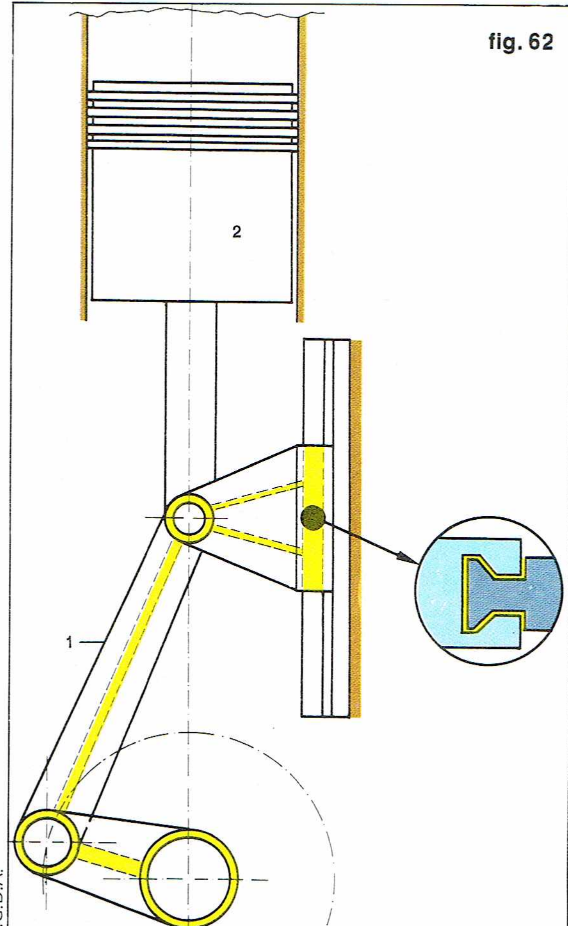
Pour limiter les efforts d'inertie, la bielle est d'autant moins longue que le moteur tourne vite. Cette pièce travaille surtout au flambement et, pour concilier légèreté et rigidité, sa section a souvent la forme d'un I. Les métaux utilisés sont l'acier sur les gros moteurs, la fonte ou des alliages d'aluminium sur les petits moteurs.

Le fonctionnement de l'axe de pied de bielle a longtemps posé des problèmes, car c'est une pièce très sollicitée (flexion) qui n'est animée que d'un mouvement relatif de faible amplitude par rapport au piston. Le graissage de cet axe se fait donc dans des conditions difficiles. Les solutions techniques varient avec les constructeurs. L'axe peut être :

— solidaire de la bielle et libre dans le piston ;

— fixé sur le piston avec portage dans la bielle (avec éventuellement montage sur aiguilles) ;

— entièrement libre (axe flottant). C'est cette dernière solution qui est généralisée sur les petits moteurs.



▶ *Figure 62 ; manivelle à tête en crosse : 1, bielle ; 2, piston. Cette disposition s'impose dans les moteurs à double effet.*

La tête de bielle est articulée sur une partie de la manivelle appelée *maneton*. Cette articulation est généralement démontable. Certains petits moteurs font exception, en particulier lorsque la tête de bielle est montée sur roulement à billes. Cet assemblage de la tête de bielle sur le maneton est soumis à des efforts cycliques importants dus à la transmission de l'effort moteur ainsi qu'à la force centrifuge. En revanche, le graissage de cette partie est facile, du fait que l'huile sous pression peut y être amenée par l'intérieur du vilebrequin. Certaines conditions de fonctionnement comme le démarrage, au début duquel la pression d'huile n'est pas établie, imposent l'emploi de matériau antifriction. Pour diminuer le coût d'un changement éventuel, ce matériau est déposé sur une pièce amovible en deux parties, appelées *coussinets*. Les matériaux antifriction les plus connus sont le métal blanc ou régule (90 % d'étain), qui a été très utilisé et progressivement remplacé par des alliages au cuivre ou à l'aluminium qui supportent des pressions plus élevées à plus haute température.

Sur les moteurs où les cylindres sont alignés, chaque bielle est articulée sur un maneton. Sur les moteurs en V, deux bielles doivent s'articuler sur le même maneton. Plusieurs dispositions sont adoptées : le système bielle-biellette où une des bielles plus petite tourillonne sur un axe porté par la tête de la bielle normale, le système bielle à fourche où une bielle normale tourillonne dans la tête de l'autre en forme de fourche, ou le système bielles accolées.

* *Arbre-manivelle*

L'arbre-manivelle ou vilebrequin reçoit et transmet au récepteur le mouvement de tous les attelages. Il tourillonne dans des paliers-supports portés par le bâti du moteur.

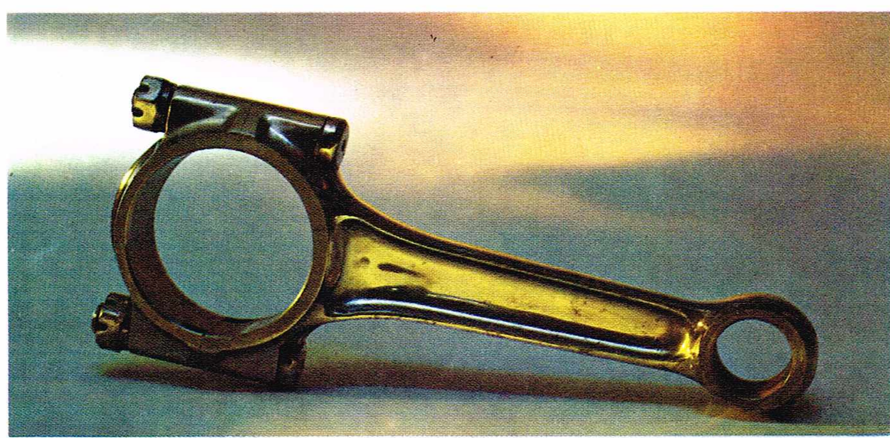
Cet arbre travaille à la flexion et à la torsion. Tous les efforts sont cycliques et engendrent des contraintes de fatigue. On s'efforce donc de réduire ces efforts en plaçant des contrepoids sur chaque manivelle pour équilibrer les masses liées au maneton. L'arbre-manivelle entièrement monté doit être enfin correctement équilibré.

Le matériau utilisé est généralement l'acier. Les vilebrequins sont constitués d'un ou plusieurs tronçons selon les constructeurs. La construction en plusieurs morceaux (polyblocs) est générale sur les gros moteurs mais elle est également utilisée sur les petits moteurs. Le vilebrequin est foré pour livrer passage à l'huile de graissage des paliers fixes et des têtes de bielle.

* *Soupapes*

Une soupape se compose d'une « tête » et d'une « tige » appelée aussi « queue », raccordées par un collet.

Les soupapes sont réalisées en aciers alliés pour l'admission, et en acier inoxydable pour l'échappement (pour résister à la corrosion à chaud). On utilise aussi sur les zones en contact (siège et portée) des dépôts de matériaux très durs comme le stellite.



I.G.D.A. - Rizzi

▲ ***La bielle est, dans les machines alternatives, une pièce de liaison entre le piston d'une part, et la manivelle d'autre part.***

Les soupapes doivent être parfaitement guidées pour leur assurer une très bonne assise sur leur siège. C'est de la qualité de ce contact que dépendent l'étanchéité de la soupape et son refroidissement.

* *Distribution*

On appelle *distribution* l'ensemble des mécanismes dont le mouvement, synchronisé avec celui du piston, commande le déroulement des différentes phases du cycle. Les organes d'exécution ont déjà été examinés aussi bien pour les moteurs à explosion que pour les moteurs Diesel : allumeur, pompes à combustible, soupapes.

La question est maintenant de voir comment ces différents organes sont commandés pour assurer la régulation du moteur.

Pour la levée des soupapes ou la commande des pompes d'injection, le dispositif utilisé est l'*arbre à cames*. La rotation de cet arbre est synchronisée avec celle du moteur par un système d'entraînement dont les trois montages les plus classiques sont l'entraînement :

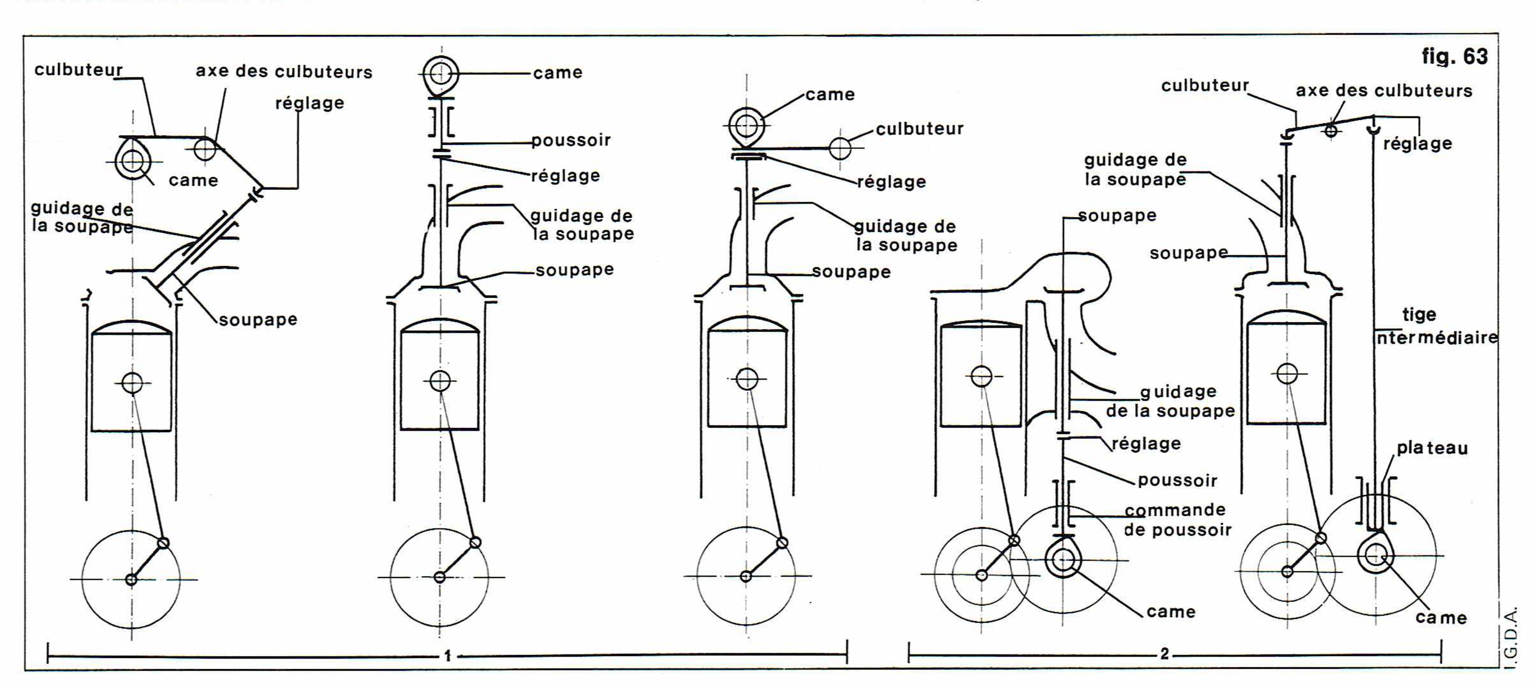
— par arbre vertical ;
— par chaîne ;
— par engrenages droits.

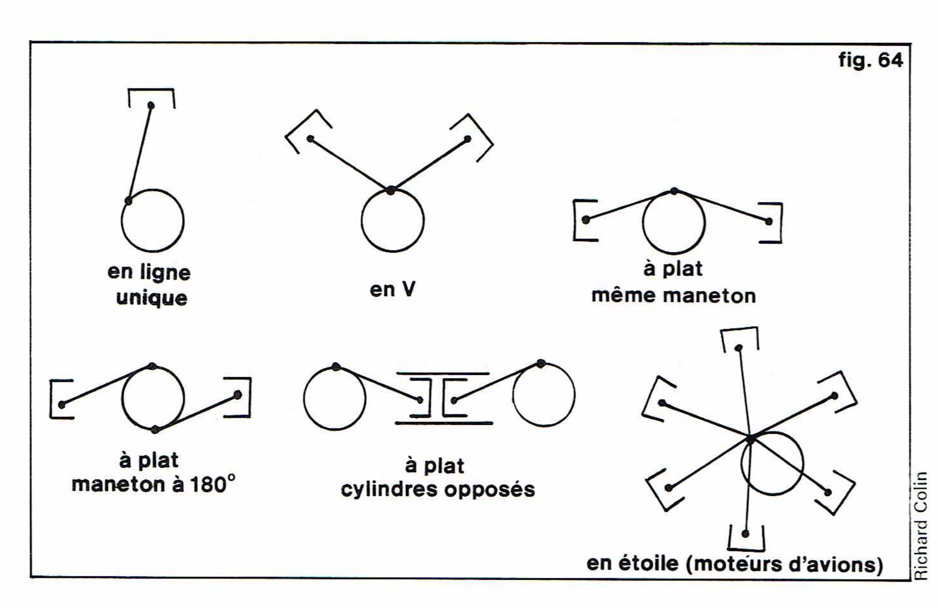
Ces diverses solutions (voir *fig.* 63) permettent de laisser l'arbre à cames dans le carter ou de le surélever (arbre à cames latéral), et même de le placer au-dessus du moteur (arbre à cames en tête).

Il existe pour la commande des soupapes différentes dispositions. Les soupapes peuvent être en effet :

— alignées sur une ligne ou deux lignes ;
— à côté du moteur (solution latérale) ou au-dessus (en tête) ;
— à attaque directe ou à attaque par culbuteurs. Dans ce dernier cas, la commande des culbuteurs par l'arbre à cames se fait soit directement, soit par brimbale.

▼ ***Figure 63 ; représentation schématique de la* distribution *: 1, soupapes en tête avec arbre à cames en tête ; 2, soupapes latérales et soupapes en tête avec arbre latéral.***





▲ *Figure 64 : arrangement des cylindres sur un moteur à piston.*

▼ *Figure 66 : balayage et couplage des manivelles dans un moteur Diesel 2 temps à pistons opposés.*

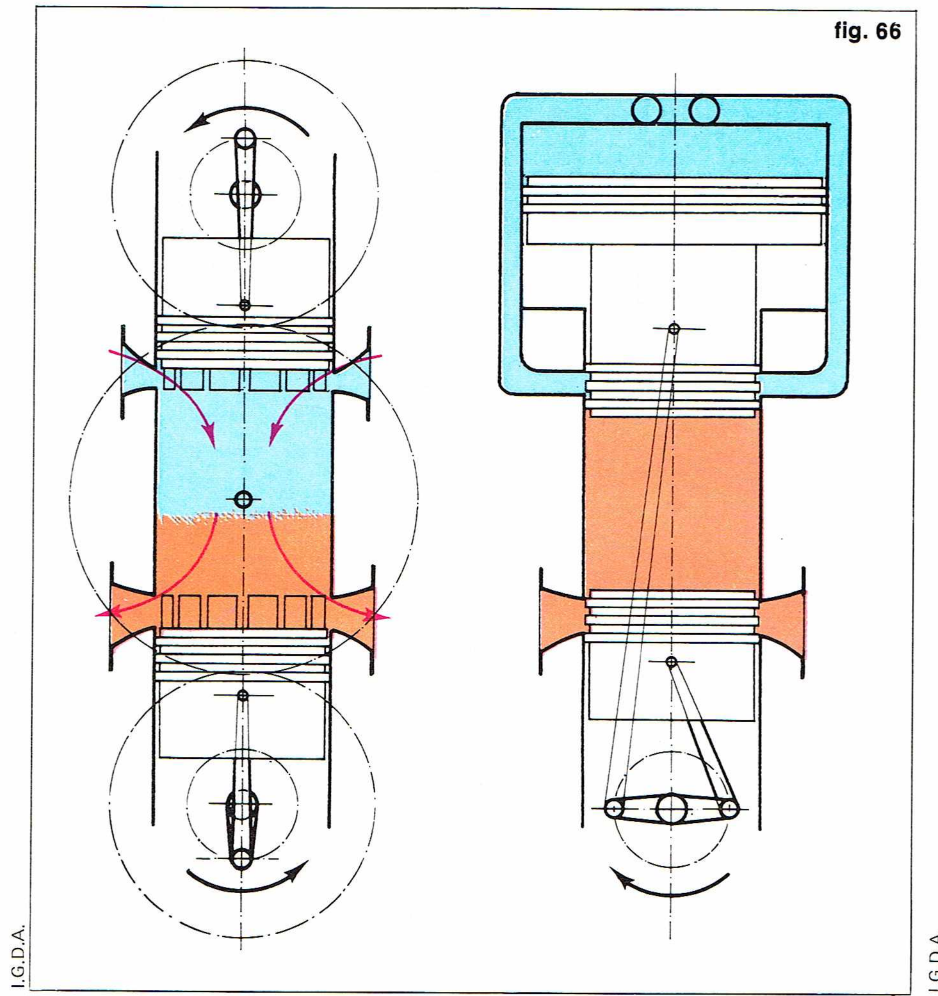
▶ *Figure 65 : architecture d'un gros moteur Diesel lent 2 temps du type MAN (section transversale du cylindre).*

On trouvera sur la *figure* 63 les dispositions les plus classiques de commande de soupapes.

On trouve des dispositions analogues pour la commande des pompes à combustible sur les moteurs Diesel.

L'allumeur sur les moteurs à explosion ainsi que les différentes pompes attelées que l'on rencontre sur tous les moteurs sont entraînés de la même façon par des prises de mouvement sur l'arbre-manivelle, soit directement, soit à partir de la commande de l'arbre à cames.

Tous les organes et mécanismes de la distribution sont conçus de façon à permettre le réglage initial et la vérification en service de tous les éléments de la régulation du moteur.

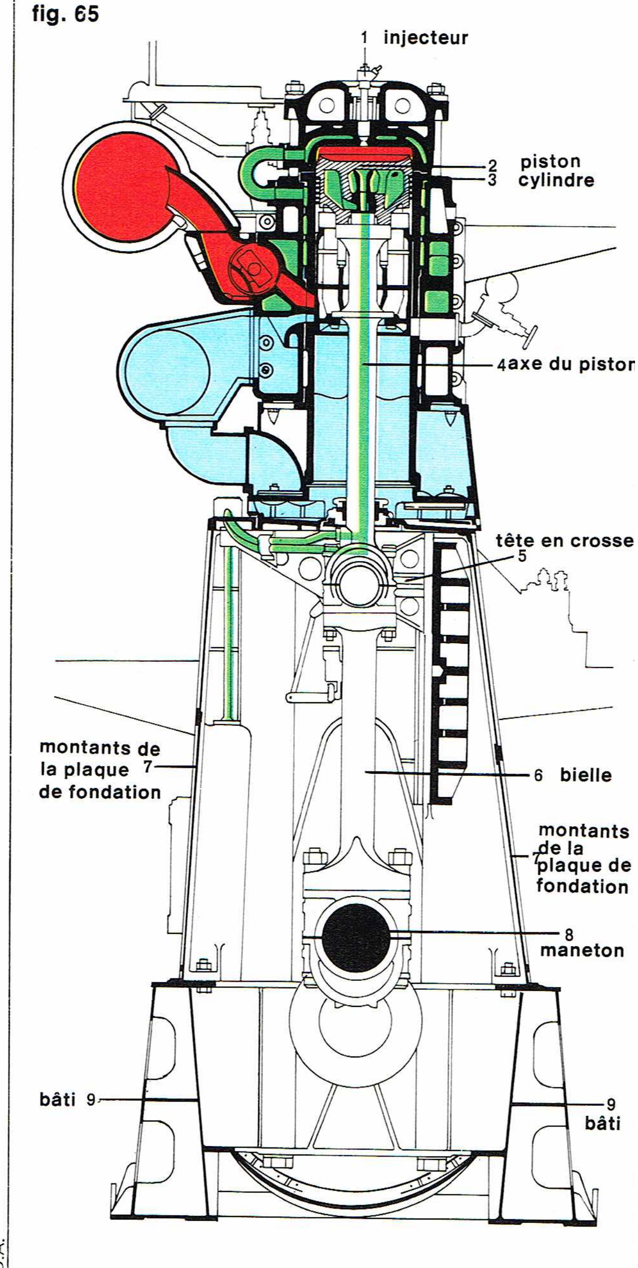


Architecture des moteurs à volume variable

L'effort moteur du piston est transmis sur la plus grande partie des moteurs à un arbre par le système classique « bielle-manivelle ». Mais depuis très longtemps, les ingénieurs ont cherché d'autres solutions de moteurs supprimant les forces d'inertie dues au mouvement des pièces génératrices de vibrations difficiles à maîtriser. Les efforts ont porté surtout sur les turbines à gaz, les machines à flux continu, mais également sur les moteurs à capsulisme. Dans ce dernier domaine, la plupart des inventions ont donné lieu à des réalisations ingénieuses mais sans intérêt pratique. Aujourd'hui, quelques solutions ont réussi à s'imposer, sans toutefois concurrencer sérieusement les moteurs traditionnels : moteurs à piston libre et moteurs à piston rotatif. On en trouvera ci-après une description.

* *Moteurs à piston et bielle-manivelle*

Mis à part les moteurs 2 temps des petites cylindrées, la quasi-totalité des moteurs comprend plusieurs cylindres. Les avantages sont nombreux : couple plus régulier, meilleur équilibrage, démarrage plus facile. D'autre part, la réalisation de puissances importantes conduit au fractionnement de la puissance, car il faut augmenter la vitesse, et on ne peut le faire, à cause des effets d'inertie sur les attelages, qu'en diminuant l'alésage.



Les groupements de cylindres sont très variés (voir *fig*. 64). On peut distinguer :

— les groupements en ligne : ligne unique, en V ,à plat (flat), qui sont les solutions les plus classiques;

— les groupements en étoile : étoile simple jusqu'à 9 cylindres, ou étoile double, triple ou quadruple. Ils ont surtout été utilisés sur les moteurs d'avions.

Cette possibilité de groupement des cylindres permet aux constructeurs de limiter leurs études à la mise au point de quelques monocylindres types et de proposer ensuite à la clientèle des moteurs dans une large gamme de puissances, ceux-ci étant réalisés par la réunion de cylindres identiques en groupements qui diffèrent par le nombre de cylindres et leur disposition. Compte tenu du caractère éprouvé de la technologie de ce type de moteurs, l'architecture générale est sensiblement la même chez tous les constructeurs.

Sur les moteurs à explosion, le moteur est constitué d'un bloc-cylindre en fonte, pièce monobloc venue de fonderie. La partie inférieure de ce bloc constitue la partie supérieure du carter. Elle supporte l'arbre vilebrequin par les paliers. Ce bloc reçoit :

— à sa partie supérieure, sur un plan de joint, la culasse;

— à sa partie inférieure, le carter. La partie inférieure du bloc culasse participe généralement au volume du carter.

Sur les moteurs modernes, on rapporte dans les cylindres des chemises dont le matériau est judicieusement choisi pour faciliter le frottement. Ces chemises généralement amovibles peuvent être emmanchées dans le cylindre (chemises sèches) ou en contact direct avec l'eau du circuit de réfrigération (chemises humides).

La culasse est du même métal que le bloc-cylindre. Ces pièces sont généralement en fonte mais on utilise aussi des alliages d'aluminium.

Le carter enveloppe toutes les pièces en mouvement des attelages. Il sert de réserve d'huile pour le circuit de graissage et contient en général la pompe à huile.

Les moteurs 2 temps à explosion sont en général d'une architecture très simple. L'alimentation se fait par lumières, il n'y a donc pas de soupapes. La compression se fait par le carter : on utilise le piston lui-même par sa face inférieure pour refouler le mélange carburé, introduit préalablement dans le carter, dans le cylindre. La face supérieure, au fond du piston, présente une sorte de bosse qui, en jouant un rôle de déflecteur, évite l'association du mélange carburé et des gaz d'échappement. Pour graisser ce type de moteur, on introduit de l'huile dans l'essence dans une proportion de 3 à 5 %. Cette huile se consomme pendant la marche du moteur.

L'architecture des moteurs Diesel 2 temps et 4 temps ne diffère guère pour les petites et moyennes puissances de celle des moteurs à explosion.

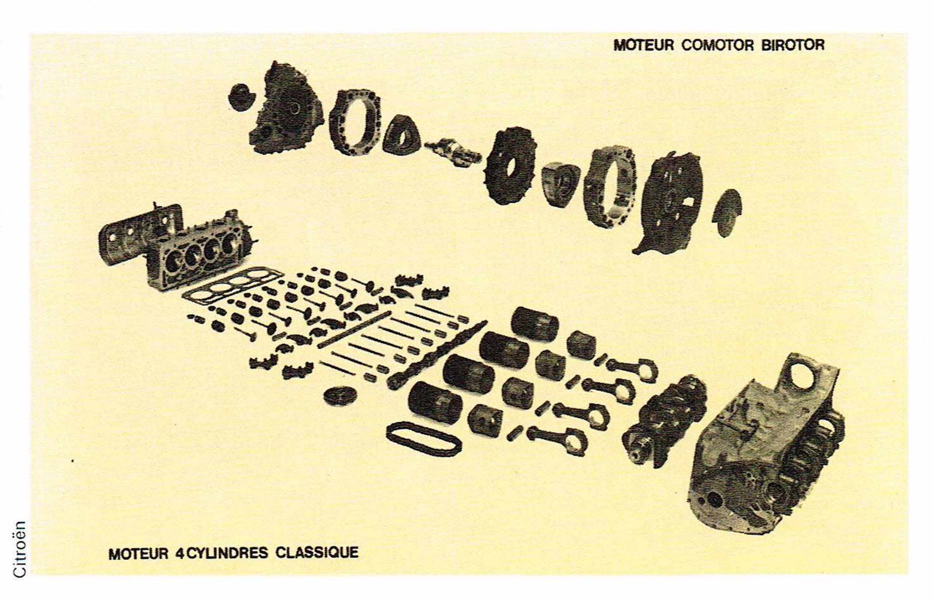
Les gros moteurs ont une structure plus complexe (voir *fig*. 65). On peut distinguer, en partant du bas vers le haut : une plaque de fondation, un bâti et les blocs-cylindres fermés individuellement par une culasse. Les blocs-cylindres se présentent séparément ou par assemblage de plusieurs cylindres. Ces moteurs ont généralement leur cylindre en ligne et travaillent à simple effet ou à double effet. Les moteurs double-effet (combustion de chaque côté du piston) existent surtout en 2 temps (on dispose alors d'un temps moteur par tour). Les attelages de ces gros moteurs sont montés généralement avec crosse.

Parmi les autres configurations utilisées dans l'architecture des moteurs Diesel, on peut citer encore le moteur à pistons opposés qui nécessite un attelage sur deux de grande dimension (*fig*. 66). Les moteurs de puissance intermédiaire sont souvent réalisés en V.

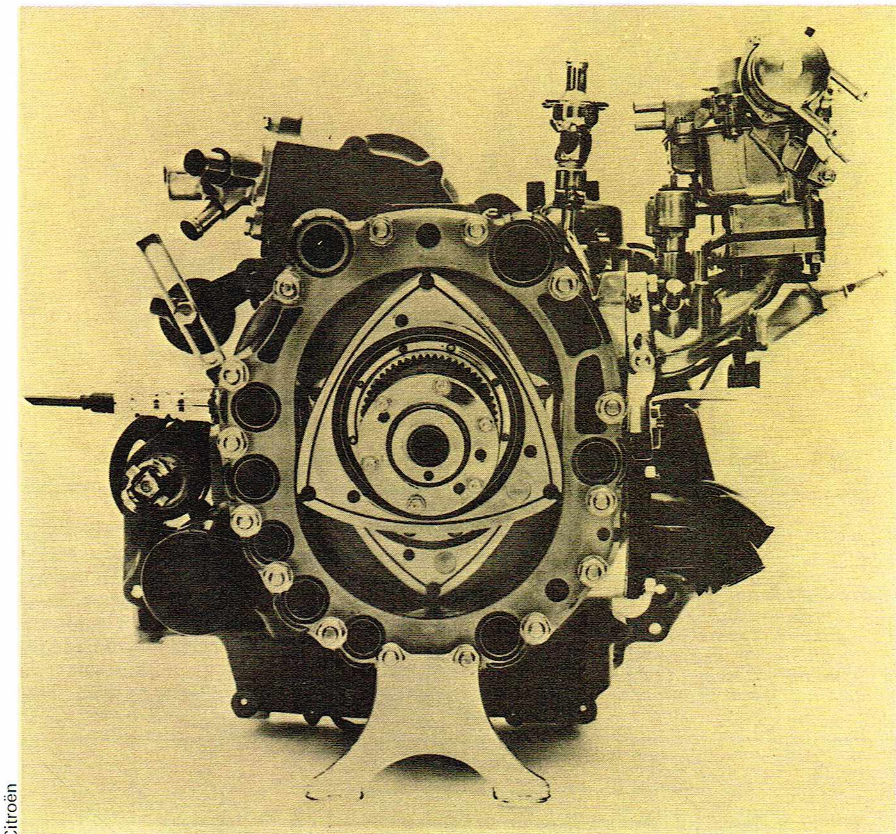
★ *Moteurs à pistons libres*

Ce type de moteur ne fournit pas directement de l'énergie mécanique mais fonctionne comme un générateur de gaz chauds sous pression. Il est donc en général associé à une turbine à gaz qui fournit l'énergie utile.

Un groupe moteur est composé habituellement de plusieurs générateurs identiques. Chaque générateur comprend un cylindre Diesel 2 temps équicourant avec l'injecteur au centre et 2 pistons de part et d'autre. Chaque piston Diesel est solidaire d'un piston de compresseur qui fournit l'air de balayage. Le mouvement de ces pistons est synchronisé par un ensemble de biellettes et limité par un matelas d'air comprimé.



Citroën


Citroën

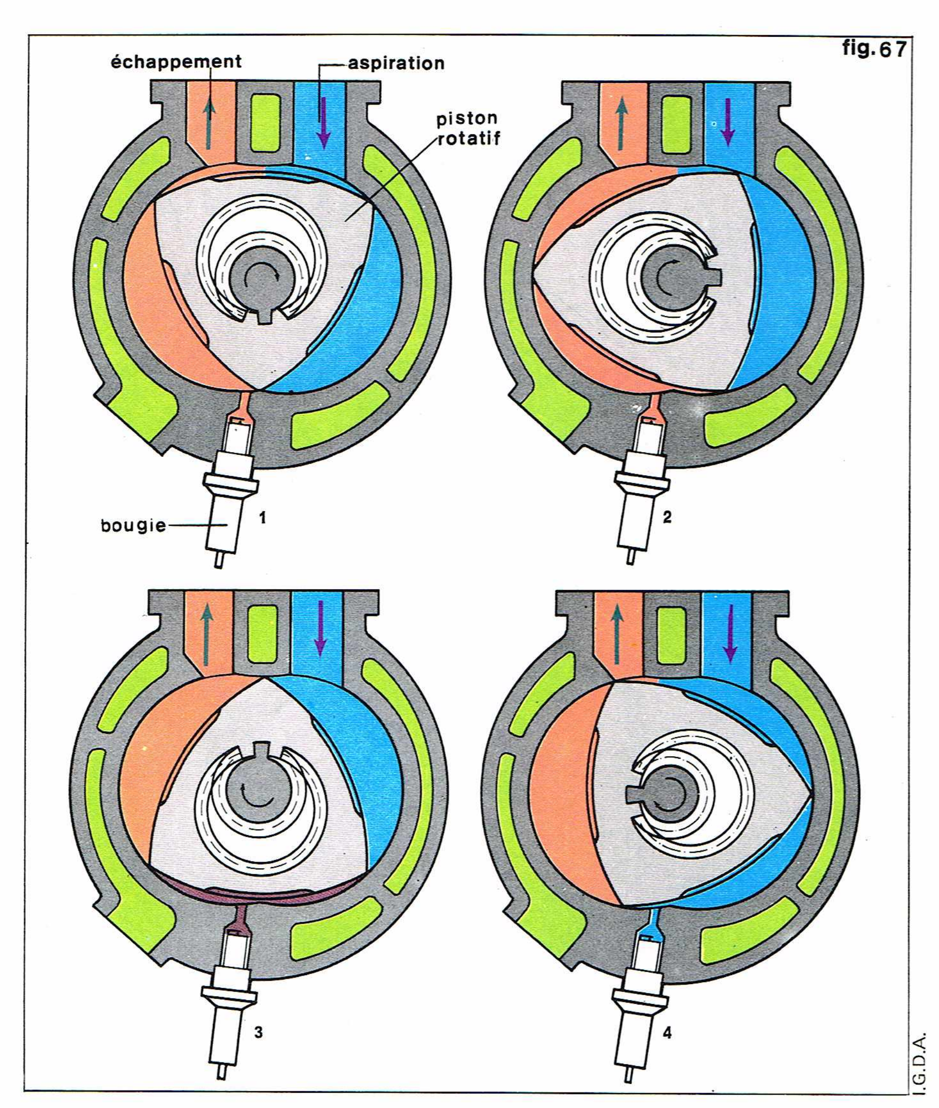
▲ ***En haut, comparer le nombre de pièces entrant dans un moteur comotor birotor et un moteur 4 cylindres classique.***
En bas, le moteur birotor.

Comme les moteurs Diesel 2 temps, ces générateurs peuvent brûler des combustibles lourds. Ils peuvent concurrencer avec leur turbine associée soit les moteurs Diesel, soit les turbines à compresseur. Ils ont fait l'objet d'applications dans les domaines de la propulsion navale comme groupe propulsif de petits bâtiments et de la production d'électricité comme groupe de pointe. La gamme de puissance usuelle va de 500 à 5 000 kW.

★ *Moteurs à piston rotatif (moteurs Wankel)*

Le principe de ce moteur est connu depuis fort longtemps mais sa réalisation pose de difficiles problèmes de mécanique, ce qui explique sa venue tardive sur le marché. L'avenir dira si ce moteur n'est pas venu trop tard, car ses qualités intrinsèques devraient lui permettre un développement brillant (*fig*. 67).

L'idée de ce moteur est de réaliser les volumes variables (capsulisme) rencontrés dans les moteurs alternatifs par la rotation d'un rotor dans une chambre. Dans les moteurs commercialisés actuellement, appelés moteurs Wankel du nom du professeur allemand qui en a pris le



▲ *Figure 67 : les quatre phases du cycle de fonctionnement du moteur à piston rotatif (type Wankel).*
▼ *Figure 68 : voir légendes groupées page ci-contre.*

brevet, le rotor, de forme triangulaire, tourne dans un carter étanche, entraîné par un train d'engrenage. Le système est conçu pour que le rotor reste en permanence en contact avec le carter, ce qui crée trois volumes variables, susceptibles d'être utilisés dans un cycle 4 temps, à explosion ou Diesel. L'étanchéité entre rotor et carter est réalisée par segments. Le rapport volumétrique de compression est adapté en creusant une cavité dans les faces du rotor. Deux ou plusieurs rotors peuvent être associés dans le même moteur; ainsi constitué, le moteur à piston rotatif est très simple. Son fonctionnement est souple et silencieux. Il peut fonctionner avec de l'essence d'indice octane peu élevé. Sa consommation, à puissance égale, est légèrement supérieure à celle des moteurs classiques; en revanche, ses gaz d'échappements sont moins polluants. On le trouve aujourd'hui sur divers modèles de voitures automobiles, en général sous la forme d'un moteur birotor.

Turbines à gaz

Les turbines à gaz font partie avec les turbines à vapeur, qui seront présentées plus loin, de la grande famille des turbomachines. On distingue ainsi les appareils dans lesquels un transfert d'énergie a lieu entre une masse tournante appelée « rotor » et un fluide en écoulement.

Ce fluide peut être incompressible, et c'est le cas dans les turbines hydrauliques. Il peut être compressible et incondensable (turbines à gaz) ou compressible et condensable (turbines à vapeur). Dans ces deux derniers types de machines, turbines à gaz et à vapeur, l'énergie contenue dans le fluide est initialement d'origine thermique et la détente de ce fluide permet de recueillir de l'énergie mécanique.

Description sommaire

Les turbines à gaz peuvent être réalisées dans des configurations plus ou moins complexes qui dérivent toutes du schéma le plus simple qui comporte un compresseur, une chambre de combustion et une turbine (voir *fig.* 68 et 69).

Cet ensemble, ainsi constitué, est appelé *turbomoteur*. La turbine est actionnée par les gaz de combustion, obtenus en brûlant du combustible à pression constante dans de l'air préalablement comprimé par le compresseur. La turbine fonctionne sur le même principe qu'une turbine à vapeur. Elle entraîne le compresseur, et l'énergie en excès peut être prélevée sur l'arbre commun ou dans les gaz d'échappement. Si toute la puissance est récupérée dans les gaz d'échappement pour produire une poussée, on a réalisé un turboréacteur. La puissance peut être intégralement prélevée sur l'arbre pour entraîner une hélice comme dans le turbopropulseur ou toute autre machine réceptrice.

Le turbomoteur se présente donc comme un moteur à turbine qui se compare au moteur Diesel. On peut distinguer les mêmes phases de fonctionnement : aspiration, compression, combustion à pression constante (isobare), détente et échappement, à la différence importante près que, dans un moteur Diesel, ces phases sont successives dans le même cylindre, alors qu'elles se déroulent en continu et de façon concomitante sur une turbine à gaz.

Cycle théorique - Cycle réel

Le cycle thermodynamique de la turbine à gaz comprend trois phases : compression, combustion, détente; une quatrième pouvant être représentée par l'atmosphère. Le

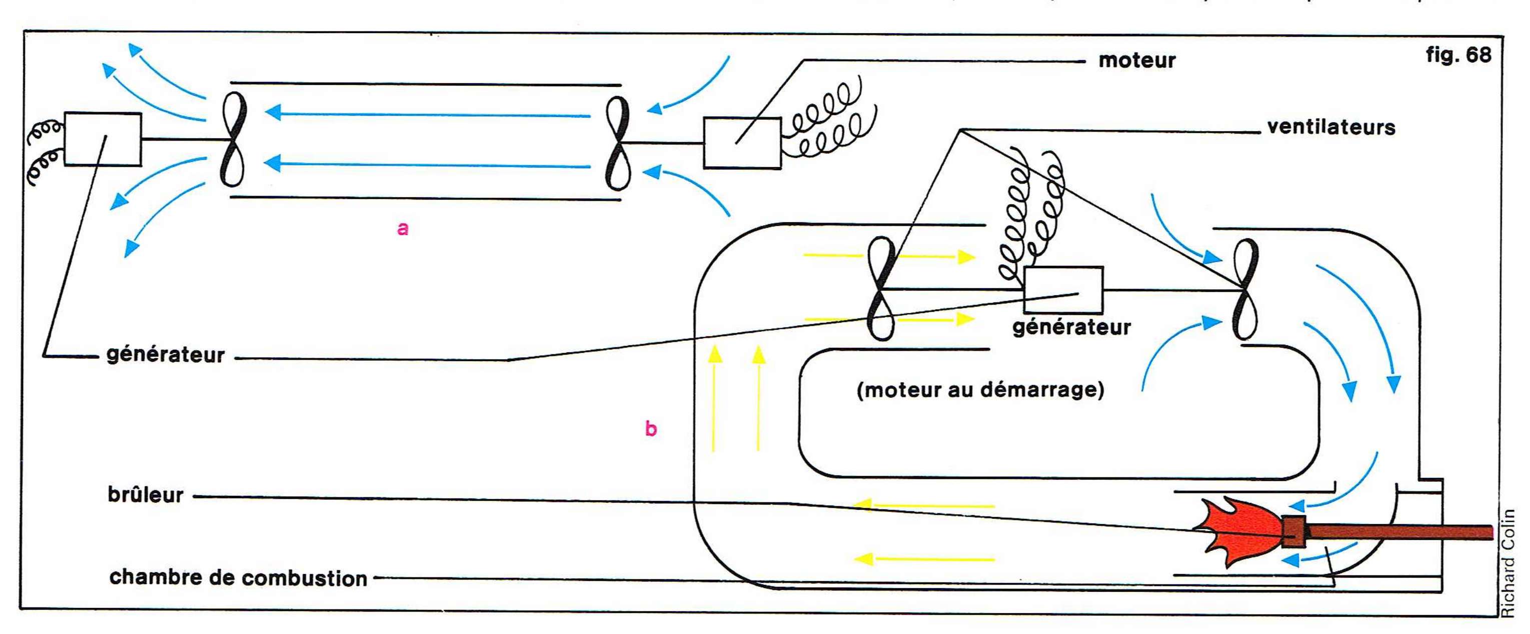


diagramme correspondant (p, V) est représenté sur la *figure* 70 ; il est appelé diagramme de Joule ou diagramme de la turbine à gaz.

Au cours de la première phase se fait la compression, au cours de la seconde l'apport de chaleur dans la chambre de combustion. Seule une partie de l'air comprimé (au plus 30 %) est utilisée pour la combustion, le reste permettant de refroidir les parois de la chambre de combustion et de limiter ensuite par mélange avec les gaz brûlés la température de ces derniers. Une turbine à gaz fonctionne donc avec un large excès d'air très supérieur à celui des moteurs Diesel. Cet excès d'air permet, comme on le verra plus loin, d'alimenter une chaudière avec les gaz d'échappement d'une turbine à gaz. La troisième phase est constituée par la détente.

Rendement

Le cycle de la turbine à gaz peut être défini sur le diagramme entropique (voir *figure* 71a) par deux isobares reliant une source fluide et une source chaude. Les points caractéristiques du diagramme sont :

A - Source froide p_A pression atmosphérique
T_A température de l'air ambiant

B - Fin de compression p_B et T_B, pression et température de l'air comprimé.

C - Source chaude T_C, température entrée turbine (avant détente).

D - Fin de détente T_D, température en fin de détente.

Toutes les températures sont exprimées en degrés Kelvin (T).

$$m = \frac{T_B}{T_A} = \frac{T_C}{T_D}$$

est le taux d'échauffement lors d'une compression isentropique (S = Cte) qui est égal au rapport des températures de compression.

On montre que $m = \beta^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}}$, avec β taux de compression : $\beta = \frac{p_B}{p_A}$, γ étant le rapport $\frac{C_p}{C_V}$ des chaleurs massiques à pression constante et à volume constant.

Le travail massique (pour 1 kg de fluide) fourni pour la détente adiabatique dans la turbine s'écrit :

$$W_t = C_p\,(T_C - T_D)$$

Le travail absorbé par le compresseur :

$$W_C = C_p\,(T_B - T_A)$$

Le travail utile représente la différence entre le travail fourni par la turbine et celui qui est absorbé par le compresseur :

$$W_u = W_t - W_C = C_p\,[T_C - T_D - T_B + T_A]$$

La dépense de calories a pour expression :

$$q = C_p\,(T_C - T_B)$$

Le rendement thermodynamique théorique du cycle, qui est égal au travail utile rapporté à la quantité de chaleur introduite dans le cycle, a donc pour expression :

$$\eta_T = \frac{W_u}{q} = \frac{T_C - T_D - T_B + T_A}{T_C - T_B} = 1 - \frac{T_D - T_A}{T_C - T_B}$$

or

$$\frac{T_B}{T_A} = \frac{T_C}{T_D} = m$$

d'où

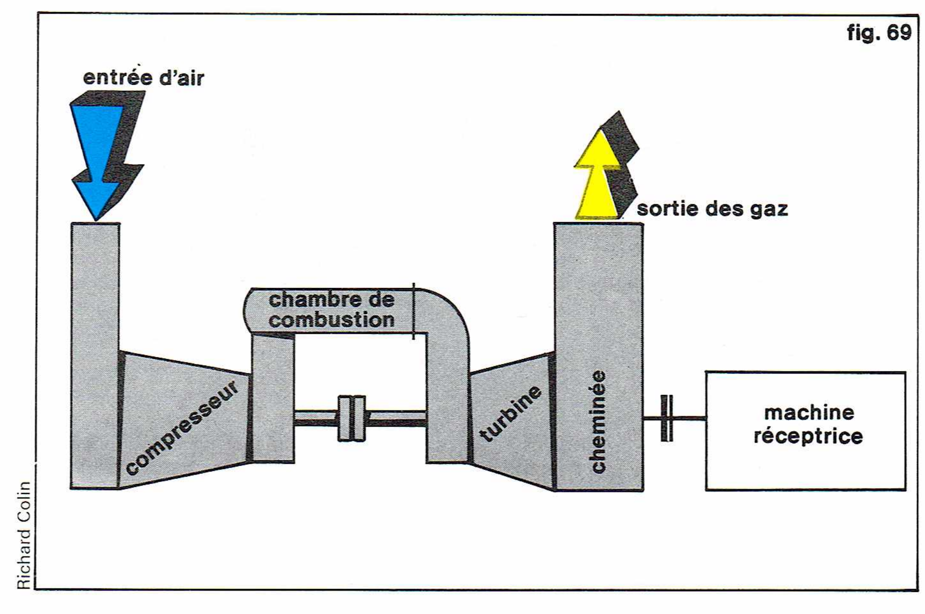
$$\eta_T = 1 - \frac{T_D - T_A}{(T_D - T_A)\,\beta} = 1 - \frac{1}{m} = \frac{1}{1 - \beta^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}}}$$

Le rendement thermodynamique théorique ne dépend donc que du taux de compression.

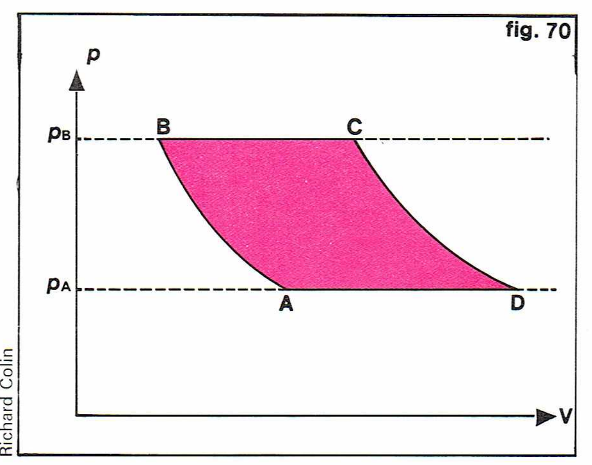
Le cycle réel diffère du cycle théorique par la compression qui n'est pas rigoureusement adiabatique, ainsi que la détente. Les courbes représentatives ne sont donc plus des isentropiques et le cycle se déforme : B devient B′ et D devient D′ (voir *figure* 71b). Le travail utile prend la forme :

$$W_u = C_p\,[T_C - T_{D'} - T_{B'} + T_A]$$

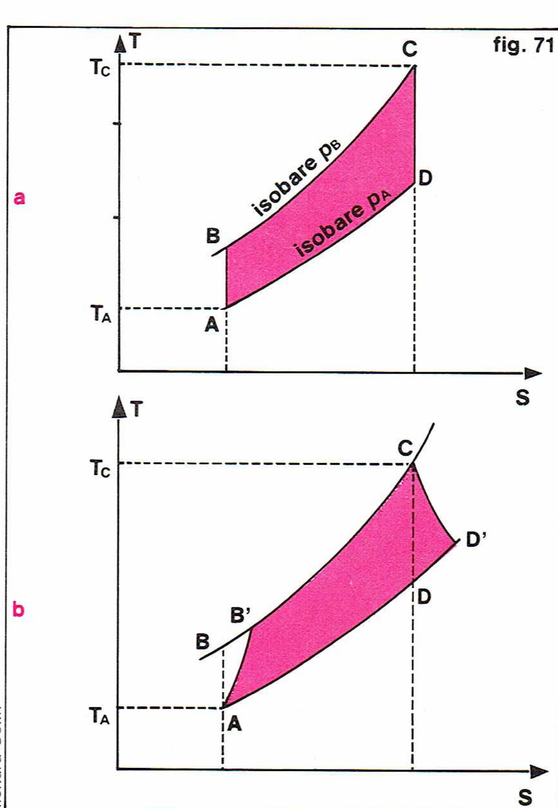
Les températures $T_{D'}$ et $T_{B'}$ étant supérieures à T_D et T_B, le travail a diminué. L'augmentation de T_C, température de la source chaude, ne peut être considérablement



◄▲ ***Figures 68 et 69 ; turbine à gaz : configuration simple et principe de combustion. Dans le schéma* a, *l'énergie mécanique du moteur est transmise au générateur par un débit d'air. Dans le schéma* b, *les deux ventilateurs sont couplés sur le même arbre et, après démarrage, l'énergie est apportée sous forme thermique par le combustible.***

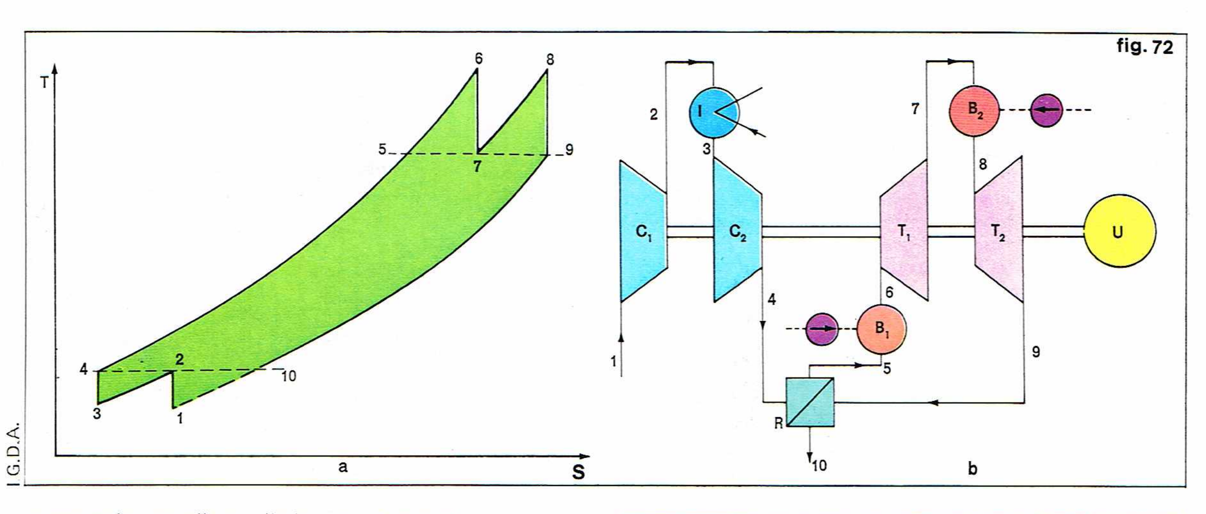


◄ ***Figure 70 : cycle de la turbine à gaz ou cycle de Joule.***

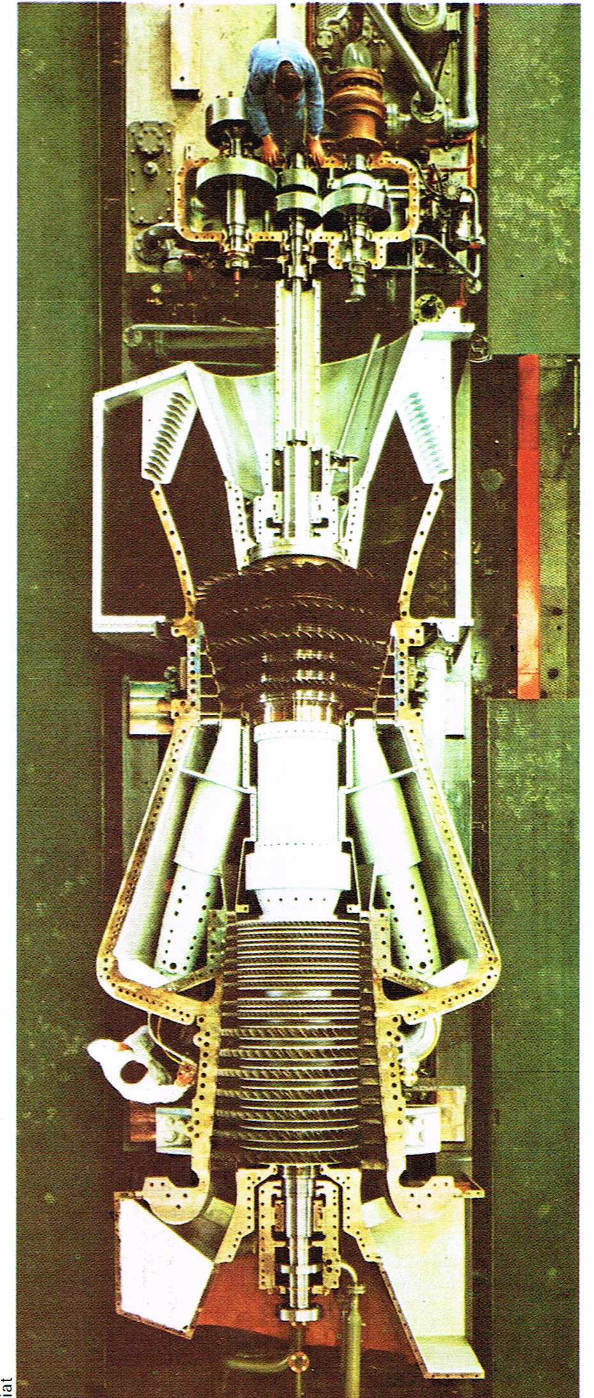


◄ ***Figure 71, cycle théorique de la turbine à gaz défini sur le diagramme entropique (a), et diagramme du cycle réel (b).***

▶ *Figure 72; (a), représentation, sur un diagramme TS, du cycle Brayton d'une installation (b) comportant deux étages de compression avec réfrigération intermédiaire, un étage de réchauffage en cours de détente, et un échangeur de récupération : C_1, C_2, compresseurs; B_1, B_2, chambres de combustion; I, réfrigérant; R, réchauffeur d'air; T_1, T_2, turbines; U, utilisateur.*



▶ *Une turbine à gaz Fiat TG 16.*



augmentée, car elle est limitée par la tenue des premiers aubages de la turbine. On augmente donc le travail utile par les deux procédés suivants : réfrigération en cours de compression, réchauffage en cours de détente et récupération sur les gaz d'échappement.

La réfrigération en cours de compression permet de remplacer la compression adiabatique par une compression qui se rapproche de l'isotherme, et on montre que le travail absorbé par le compresseur est plus faible : on gagne donc sur la puissance utile. L'installation peut comporter un ou plusieurs réfrigérants.

Le réchauffage en cours de détente permet de se rapprocher des conditions d'une détente isotherme. Cette opération est analogue à l'opération de resurchauffe sur les turbines à vapeur. La récupération des calories des gaz d'échappement permet d'économiser du combustible et d'accroître ainsi le rendement.

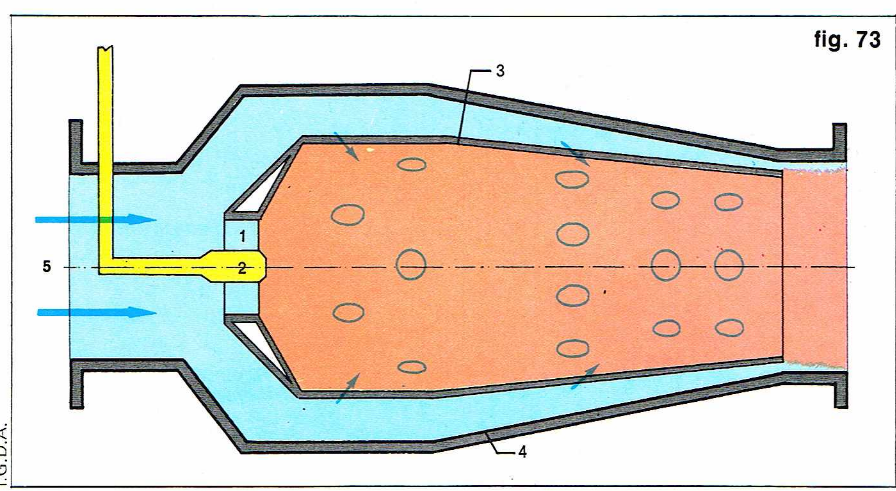
On trouvera sur la *figure* 72 le cycle réel d'une installation comportant deux étages de réfrigération, un étage de réchauffage et un échangeur de récupération. Ces dispositions permettent d'augmenter considérablement le rendement en le doublant presque, mais au prix d'une complexité qui nous éloigne beaucoup du schéma de base initial. De plus, l'installation a besoin d'eau pour fonctionner, ce qui n'est pas le cas du turbomoteur simple.

Combustion

On a déjà noté que, pour limiter la température des gaz de combustion à l'entrée de la turbine, on réalisait une combustion avec un grand excès d'air. Cet excès d'air risque de refroidir le combustible au-dessous de la température d'inflammation, donnant ainsi des imbrûlés solides dangereux pour les aubages de la turbine (érosion et encrassement). Une autre difficulté provient du fait que, sur la plupart des turbines à gaz, la place est très limitée, contrairement aux chaudières classiques, et les chambres de combustion sont très petites.

On élimine donc ces difficultés que pourrait rencontrer la combustion en créant deux zones dans la chambre de combustion :

▼ *Figure 73; représentation schématique d'une chambre de combustion : 1, chambre de mélange; 2, injecteur du combustible; 3, brûleur; 4, enveloppe extérieure; 5, entrée de l'air.*



— une zone primaire dans laquelle l'excès d'air est modéré ;

— une zone secondaire dans laquelle va s'effectuer le mélange.

Le brûleur assure la pulvérisation du combustible qui s'échauffe sous l'action du rayonnement de la flamme et des parois (température de 1 000 °C), se vaporise et brûle comme dans une chaudière classique ; on distribue l'air primaire en tourbillonnant pour provoquer un mélange intime du combustible et du carburant. L'air de mélange est injecté ensuite dans les gaz de combustion de façon à favoriser le mélange des gaz chauds et de l'air froid. Les parois du foyer et le brûleur sont refroidis par un courant d'air froid.

Une chambre de combustion (voir *figure* 73) se compose donc d'une enveloppe extérieure, travaillant à basse température et devant tenir la pression, et d'un habillage interne, non soumis à la pression, mais exposé aux hautes températures. L'enveloppe extérieure est en acier, l'habillage doit être en matériau réfractaire.

Les combustibles utilisés pour les turbines à gaz sont très variés. Sur les installations terrestres où elles concurrencent les autres types de moteurs, on donne à brûler aux turbines à gaz des combustibles bon marché : fuels lourds et même charbons pulvérisés. Le problème de la combustion est plus facile sur les installations stationnaires, car il est possible de dimensionner plus largement les chambres de combustion. On demande néanmoins aux combustibles de ne pas avoir une teneur en cendres trop élevée pour l'endurance de la turbine. Sur les turbines à gaz, le gaz naturel est un excellent combustible et de nombreuses installations l'utilisent.

Sur les turbines à gaz d'avion, en plus de la place limitée, se posent les problèmes de stabilité de flamme à tous les régimes de fonctionnement ainsi que le démarrage et le fonctionnement à très basse température. On utilise donc des carburants spéciaux appelés *carburéacteurs* et qui sont des distillats légers du pétrole (kérosène).

Problèmes technologiques

Les divers éléments constituant un groupe turbomoteur sont de technologie bien connue. On étudie et on réalise en effet depuis longtemps des compresseurs, des turbines et des échangeurs. Les problèmes nouveaux posés par les turbines à gaz ont pour origine essentielle les hautes températures que l'on rencontre dans ce type de machines.

Les compresseurs sont classiques. Ils sont très généralement de type axial à cause du bon rendement de ce type de machine et de son faible encombrement en maître-couple. Le compresseur centrifuge de fabrication plus simple est préféré sur les machines de faible puissance.

Les turbines à gaz ne diffèrent pas dans leur principe des turbines à vapeur mais les hautes températures de fonctionnement exigent le recours à des matériaux et à des solutions constructives différentes. Le point sensible se trouve sur la première roue dont les ailettes sont exposées à la température extrême du cycle, ce qui impose l'emploi d'alliages de type Ni-Cu, résistant à la température, ou de matériaux réfractaires.

Les échangeurs, que ce soient des réfrigérants ou des récupérateurs, sont semblables à ceux utilisés couramment dans l'industrie. Les réfrigérants d'air fonctionnent avec de l'eau et de l'air propre. Le récupérateur est un échangeur entre deux gaz : air et gaz de combustion. L'échange étant moins bon que dans l'échange avec un liquide, cet appareil est plus gros, donc plus coûteux. Il pose les mêmes problèmes qu'un récupérateur de chaudière : encrassement et risque d'incendie du côté gaz de combustion. On écarte ce danger d'incendie par des nettoyages périodiques. En revanche, le danger de corrosion signalé dans les réchauffeurs de chaudières (condensation dans les gaz de combustion) n'existe pas ici, puisque la température de l'air en fin de compression est supérieure à la température dangereuse (150 °C environ).

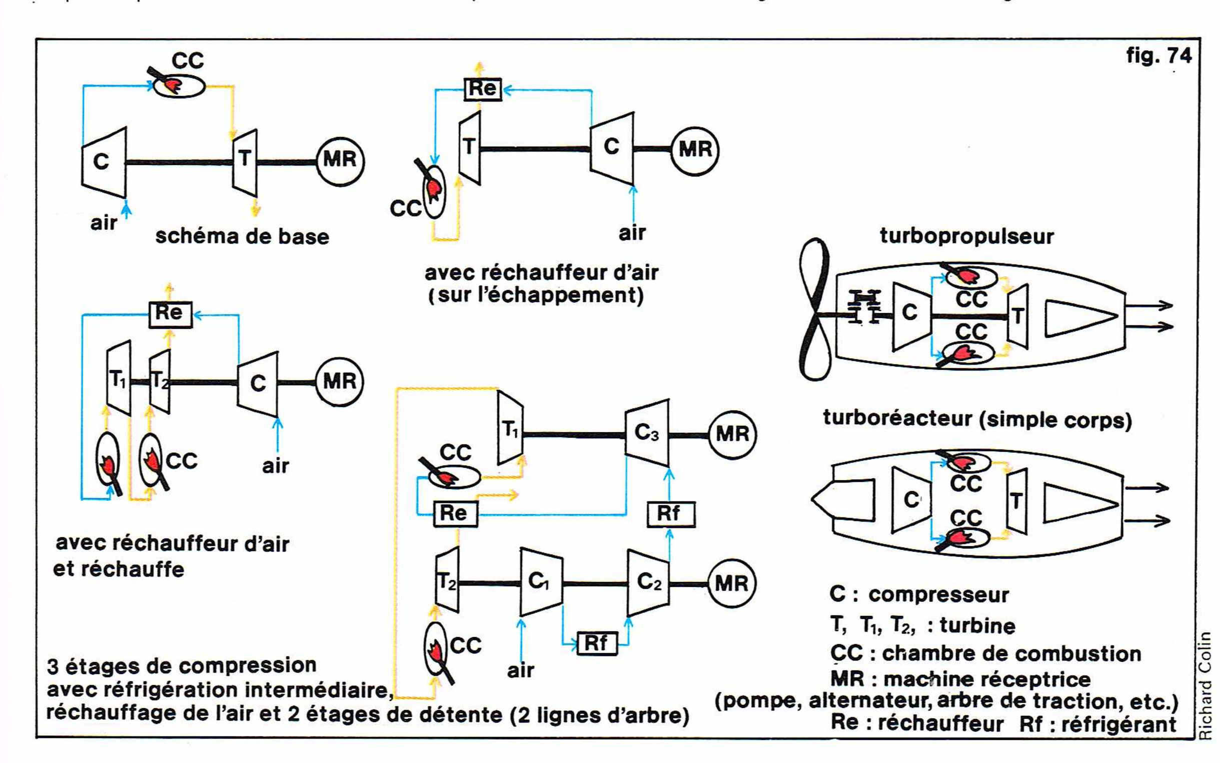
La régulation de la machine se fait par action sur le débit de combustible injecté. Pour les groupes à vitesse constante, et c'est le cas des turbines entraînant un générateur électrique, le débit d'air reste constant, et à chaque valeur de la charge correspondent un débit de combustible et une température à l'entrée de la turbine. Pour les groupes à vitesse variable, le débit d'air est approximativement proportionnel à la vitesse de rotation du compresseur, et on peut alors maintenir constante la température à l'entrée de la turbine.

Domaines d'utilisation

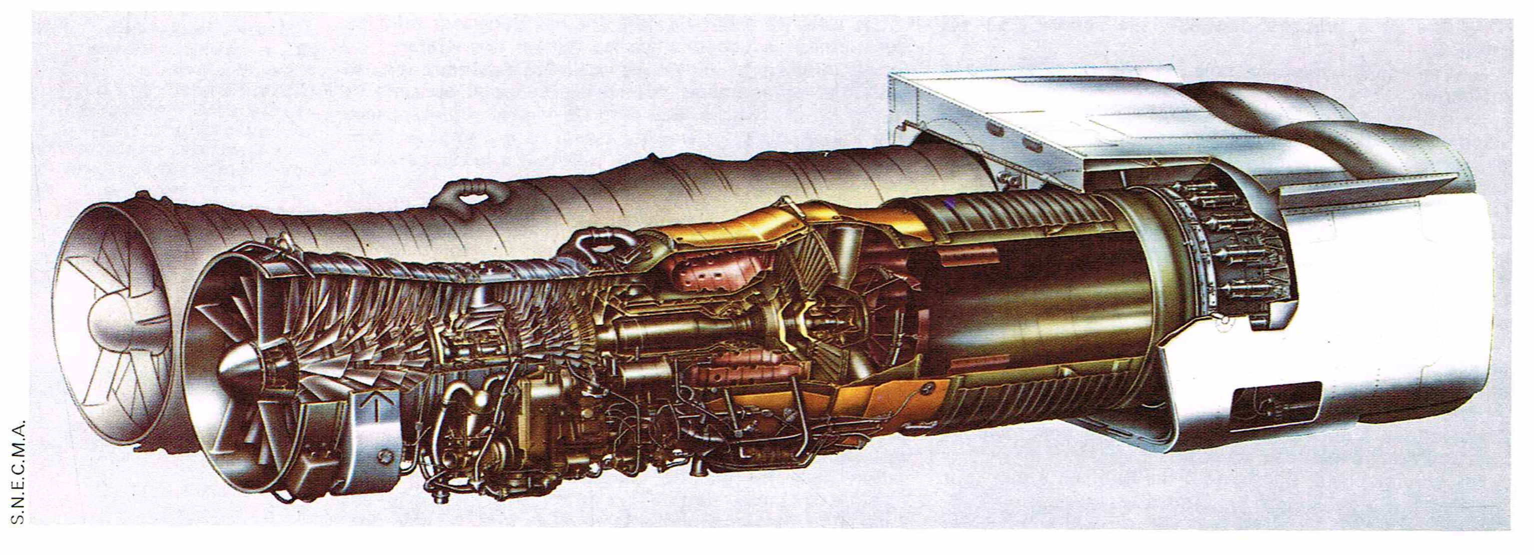
La turbine à gaz concurrence le moteur et la turbine à vapeur, et ses domaines d'utilisation recouvrent en partie ceux de ces deux types de machines.

Sur le moteur Diesel, elle a les avantages des turbomachines, et sur les autres moteurs, elle a pour elle la simplicité et la possibilité de fonctionner sans une source abondante de refroidissement. Elle ne peut cependant rivaliser dans le domaine de la propulsion automobile avec le moteur Diesel et le moteur à explosion. Sa puissance encore limitée lui ferme la production massive d'électricité telle qu'elle se pratique dans les centrales modernes. Elle a enfin des domaines d'utilisation propres où aucun type de moteur ne paraît susceptible pour l'instant de la remplacer.

Quelques types de dispositions de groupes utilisant la turbine à gaz sont donnés sur la *figure* 74.

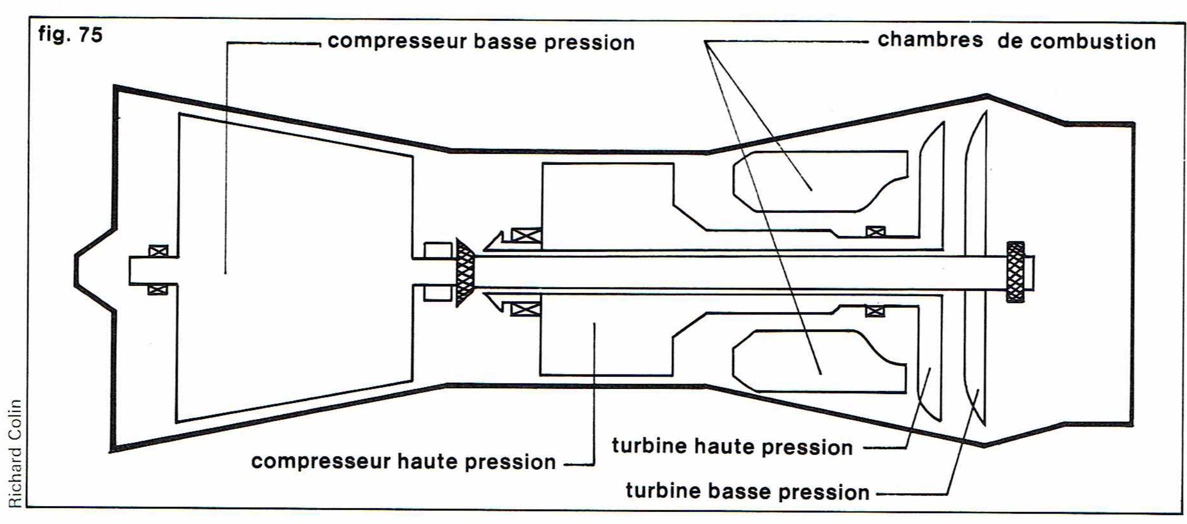


◀ *Figure 74 : types de dispositions de groupes utilisant la turbine à gaz.*



S.N.E.C.M.A.

▲ *La turbine à gaz a envahi le domaine des transports long- et moyen-courrier ; ici le turboréacteur de* Concorde *en vue éclatée.*



Richard Colin

▶ *Figure 75 : représentation schématique du réacteur double corps de* Concorde.

Ses domaines privilégiés sont les suivants.

* *Fourniture d'électricité*

La turbine à gaz est utilisée soit comme centrale de base sur de petits réseaux, soit comme centrale de pointe. Dans le premier cas, le rendement est un paramètre primordial. Comme groupe de pointe, la turbine à gaz est intéressante du fait de sa rapidité de démarrage ; le rendement est un paramètre moins important.

Les puissances des groupes vont de 5 000 kW à 80 000 kW. Certains groupes sont conçus par les constructeurs pour former un ensemble complet à la sortie d'usine (groupe package) susceptible d'être transporté ainsi, ce qui permet une mise en service très rapide.

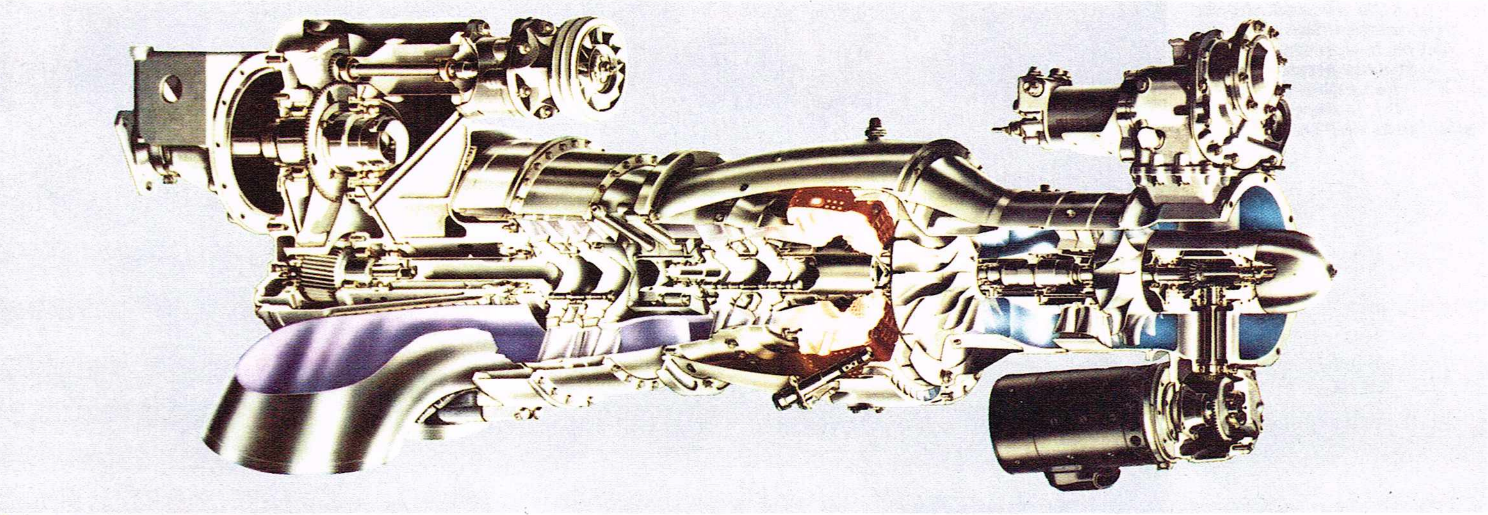
* *Entraînement de machines diverses*

La turbine à gaz est particulièrement appréciée si on dispose dans l'usine d'un combustible adapté (gaz



Turbo meca

▶ El Astazou XVI *est un turbopropulseur à arbre simple.*



Turbo meca

▲ *Le* Turmo III F *(ici, en vue éclatée) est un turbomoteur du type à turbine libre ; il équipe notamment l'hélicoptère* Super Frelon *de* Sud-Aviation *et les turbotrains* E.T.G. *et* R.T.G. *utilisés par la* S. N. C. F.

de haut fourneau par exemple).

* *Propulsion d'avion*

Sous la forme du turboréacteur, la turbine à gaz a envahi le domaine des transports long- et moyen-courrier (*fig.* 75). Elle est utilisée sur les petits appareils sous la forme de turbopropulseur ou de turbomoteur (hélicoptère).

* *Propulsion navale*

Son emploi est limité, car, en attaque directe de l'hélice, il est nécessaire d'interposer un réducteur à engrenages entre la turbine et la ligne d'arbre. Ce système ne permet pas la marche arrière.

On peut utiliser la propulsion électrique en passant par un générateur et un moteur, mais cette solution devient plus lourde et nettement plus coûteuse.

* *Propulsion ferroviaire*

Les deux types de propulsion, mécanique et électrique, ont été également mis en œuvre. La propulsion mécanique est beaucoup moins souple que la propulsion électrique, mais elle apporte un gain de poids. D'autres transmissions comme la transmission hydraulique sont actuellement à l'étude.

Moteurs statiques

Dans ces moteurs, il n'y a pas, par définition, de pièces en mouvement et il n'est donc pas possible de recueillir l'énergie mécanique sous la forme d'un couple moteur sur un arbre tournant. L'énergie produite ne peut être utilisée que sous forme de poussée et en conséquence le domaine d'application des moteurs statiques sera celui de la propulsion par réaction. Ce type de propulsion convient surtout aux véhicules se déplaçant à grande vitesse, et c'est ce qui explique que ces moteurs soient utilisés seulement en aéronautique et en astronautique.

Rappelons tout d'abord le sens de propulsion par réaction. Elle se définit comme un moyen de propulsion s'effectuant par projection de masses pesantes ; par application du principe de l'égalité de l'action et de la réaction, l'aéronef reçoit une poussée dans le sens inverse de celui de la projection. Les masses pesantes sont, dans le cas des moteurs thermiques à combustion interne, les gaz de la combustion.

Si la masse éjectée m a une vitesse v, le véhicule de masse M prendra une vitesse V, telle que

$$MV = mv$$

De plus, si la masse m est éjectée pendant un temps t, on peut exprimer la poussée P de la façon suivante, γ étant l'accélération :

$$P = m\gamma = m\frac{v}{t}$$

Comme on le voit, seule la « réaction » est à l'origine du mouvement et non pas comme on l'a cru très longtemps l'appui du jet gazeux sur l'air extérieur. La propulsion à réaction fonctionne dans le vide absolu.

Cette dernière remarque nous conduit à distinguer deux types de moteurs.

— Les moteurs utilisant l'air comme comburant ; ils ne peuvent donc fonctionner que dans l'atmosphère et on les appelle des moteurs *aérobies*.

— Les moteurs pouvant fonctionner en dehors de toute atmosphère, car ils sont alimentés par un mélange carburant-comburant ; ce sont les moteurs *anaérobies*.

En matière de terminologie, on utilise souvent le terme de propulseur à la place de celui de moteur. Cette confusion est justifiée si on remarque que la majorité des moteurs statiques à combustion interne est utilisée pour la propulsion.

Pour terminer cette introduction, remarquons que la propulsion par réaction n'est pas le domaine exclusif des moteurs statiques à combustion interne. En fait, dans l'atmosphère, les turboréacteurs sont d'un emploi généralisé. Dans les applications aéronautiques, disons que, la combustion étant le moyen le plus simple pour fabriquer et éjecter des gaz, les moteurs de fusée et particulièrement ceux de puissance élevée sont des moteurs à combustion interne.

Mais il existe bien d'autres moyens d'éjecter des particules à grande vitesse. On rentre alors dans la catégorie des propulseurs non chimiques. Ce type de propulseur fait actuellement l'objet d'études pour prendre la relève des propulseurs chimiques dont l'inconvénient majeur est l'obligation d'emporter dans l'espace tout le comburant nécessaire à la combustion.

Ces propulseurs ne sont plus des moteurs à combustion interne. Ils seront donc traités dans le paragraphe consacré aux moteurs statiques à combustion externe, bien que pour la plupart d'entre eux le terme de « combustion » ne soit guère approprié.

Moteurs statiques aérobies

Deux types de moteurs ont fait l'objet de réalisations : le statoréacteur et le pulsoréacteur.

* *Statoréacteur*

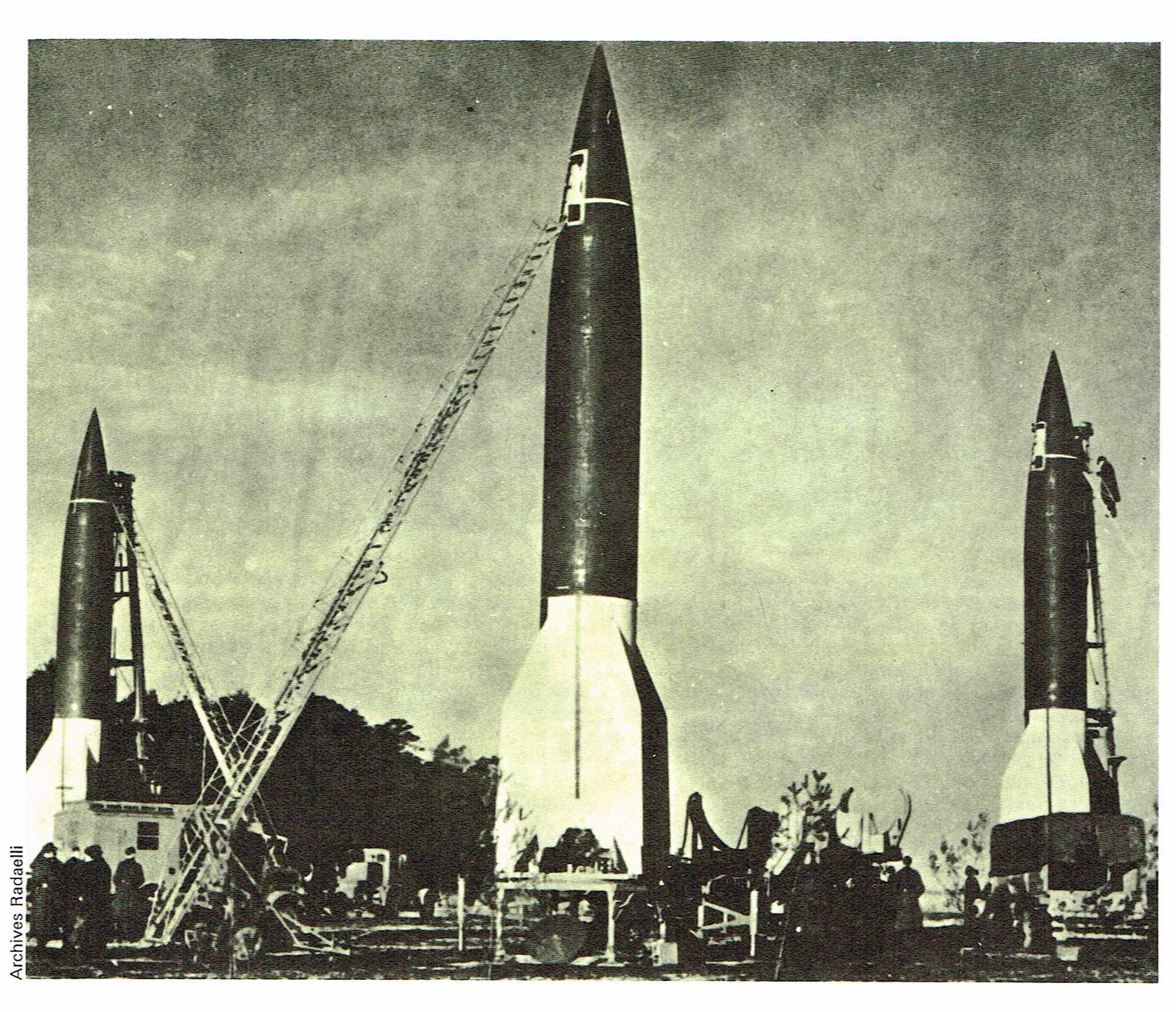
Dans ce type de moteur, l'énergie thermique résultant de la combustion d'un carburant est directement transformée en énergie cinétique pour la propulsion.

Le schéma de principe d'un statoréacteur (*fig.* 76) est très simple. Ce moteur se présente sous la forme d'une tuyère. A l'extrémité avant, l'air pénètre à grande vitesse. Un divergent augmente sa pression jusqu'à la chambre de combustion où se fait l'arrivée de combustible finement pulvérisé. Ce combustible allumé au préalable brûle ensuite au contact de la flamme. Les gaz d'échappement, à très haute température (de l'ordre de 2 000 °C), sont évacués par l'arrière. Les parois soumises aux gaz d'échappement doivent être refroidies par une circulation d'air.

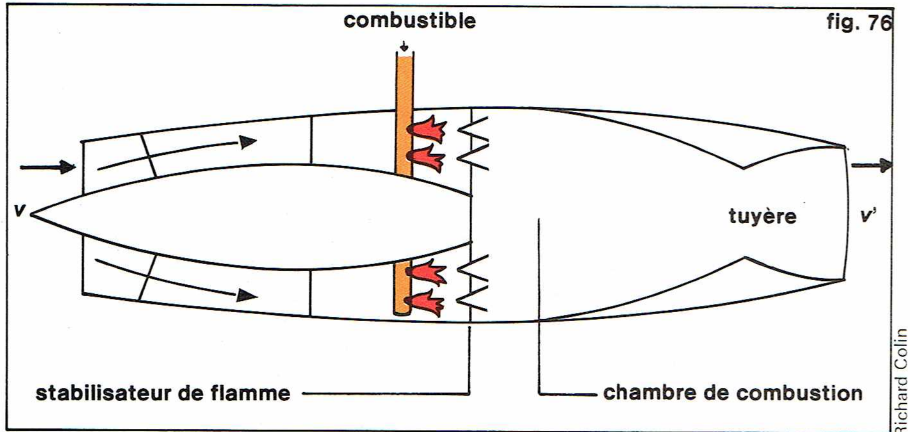
Le statoréacteur est surtout destiné aux vols dans l'atmosphère à vitesse élevée (Mach 3 à Mach 8). Son domaine d'utilisation se situe entre celui des turboréacteurs et celui des moteurs fusées, et concerne aujourd'hui uniquement la propulsion militaire. Ce type de moteur a fait l'objet d'études très poussées en France (avion Leduc) comme à l'étranger. On a surtout réalisé des avions expérimentaux ou des engins militaires comme des cibles volantes.

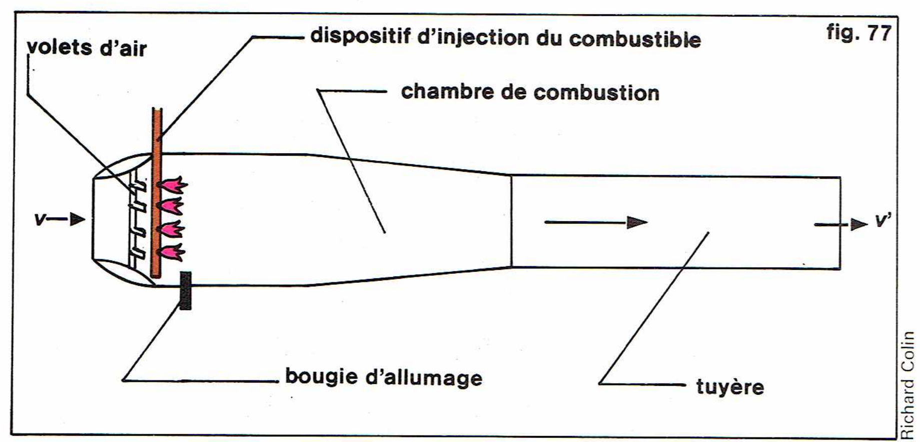
Il faut noter enfin que le statoréacteur n'est pas susceptible de démarrer un aéronef par ses propres moyens. Les

▶ *Les engins de représailles V1 et V2 de la dernière guerre étaient propulsés par des pulsoréacteurs. Ici, la base militaire allemande de Peenemünde.*


Archives Radaelli

▼ *Figure 76 : représentation schématique d'un* statoréacteur. *Figure 77 : schéma de principe du* pulsoréacteur.





engins munis de ce type de moteur doivent donc être lancés d'un avion en vol. On a donc pensé à combiner le statoréacteur avec un turboréacteur, ce qui a donné le statoturboréacteur. Le *Griffon* de la société *Nord-Aviation* était équipé d'un moteur de ce type.

* *Pulsoréacteur*

Le pulsoréacteur se présente sous la forme d'une tuyère, comme le statoréacteur, mais son fonctionnement est différent. L'entrée d'air est obturée par des volets d'air normalement fermés par des ressorts qui s'ouvrent automatiquement lorsque la chambre de combustion est en dépression. Au démarrage, le carburant injecté dans la chambre de combustion est enflammé à l'aide d'une bougie électrique et l'onde de pression résultante éjecte les gaz brûlés vers la sortie, créant ainsi une dépression dans la chambre de combustion qui entraîne l'ouverture des clapets d'entrée. Il y a donc admission d'air frais et le cycle peut recommencer (*fig.* 77).

La combustion qui s'effectue à volume constant est périodique (50 battements par seconde). Le combustible après le premier allumage s'enflamme spontanément. La colonne de gaz dans la tuyère est pulsée, d'où le nom de pulsoréacteur. Ce moteur peut, contrairement au statoréacteur, fonctionner à vitesse nulle.

Faut-il rappeler que les engins de représailles *V1* de la dernière guerre étaient propulsés par des pulsoréacteurs. Ce dispositif, bien qu'ayant été étudié dans plusieurs pays, n'a jamais connu un développement notable en raison du manque d'endurance des volets d'air d'une part et de sa consommation spécifique élevée.

Récemment, la firme allemande MMB a mis au point un nouveau type de pulsoréacteur comportant des orifices d'entrée dont le dessin particulier permet, sans aucune pièce mobile, le fonctionnement en combustion périodique. Ce pulsoréacteur sans volet justifie le classement habituel de ce type de moteur dans les moteurs statiques. Même ainsi renouvelé, il ne semble pas que ce type de moteur puisse sortir du domaine des quelques applications militaires auxquelles il semble adapté.

Moteurs statiques anaérobies

Le fonctionnement d'un moteur-fusée a propulsion chimique peut être décrit très simplement : ce moteur comprend une chambre de combustion ou foyer qui est munie d'une ouverture en forme de tuyère. Les gaz de combustion sous pression s'échappent par la tuyère, permettant ainsi l'effet de propulsion.

Pour assurer la combustion, le véhicule doit emporter à la fois le combustible et le comburant. Il est habituel de désigner ces produits sous le nom d'*ergols* : un ensemble d'ergols en rapport défini formant un *propergol*. Pour compléter ces définitions, ajoutons qu'un ergol capable de dégager de l'énergie par lui-même est appelé *mono-ergol*. Un propergol formé de deux ergols est un *diergol*, de trois ergols, un *triergol*. Lorsque deux ergols s'enflamment à la température ambiante par simple contact, on dit qu'ils sont *hypergoliques*.

On distingue deux grandes familles de propergols : les propergols solides et les propergols chimiques. Il a été imaginé des systèmes mixtes utilisant un ergol liquide et un ergol solide. Ce type de propergol (appelé *lithergol*) est au stade de l'expérimentation et n'a pas encore fait l'objet d'applications significatives.

* *Moteurs-fusées à propergol solide*

Ces moteurs, appelés aussi *moteurs-fusées à poudre*, sont très simples, et c'est ce qui explique que les premières réalisations humaines dans ce domaine se soient appuyées sur ce moyen de propulsion.

Un tel moteur comprend :

— une charge de poudre dont la combustion doit être lente et progressive ;

— une chambre de combustion dans laquelle est stocké tout le propergol à l'état solide ;

— une ou plusieurs tuyères par où vont s'échapper les gaz de combustion ;

— un système d'allumage ;

— un système d'arrêt de la poussée.

Le gros intérêt des fusées à poudre est la possibilité de stocker la fusée pendant des périodes aussi longues que la stabilité chimique de la poudre le permet, dans un état de disponibilité de lancement immédiat. Pour cette raison, ce type de fusée est surtout utilisé pour des applications militaires.

L'inconvénient principal de la fusée à poudre est qu'elle ne peut pas être allumée une deuxième fois. Il est difficile en effet d'éteindre un bloc de poudre, et on règle généralement la durée de l'application par réorientation du jet. Il n'est pas possible non plus de modifier l'intensité de la poussée, une fois le moteur allumé. La loi de poussée est donc fixée à l'avance à la construction.

On distingue en général deux familles de propergols solides.

— Les *poudres homogènes* qui ne forment qu'une phase dans laquelle comburant et combustible sont fixés sur une même molécule organique. Les produits utilisés sont généralement composés à partir de nitro-cellulose ou de nitroglycérine.

— Les *poudres composites* qui sont obtenues par un mélange intime et homogène d'un combustible et d'un comburant.

Généralement, le combustible est un composé organique ou un corps simple réducteur, et l'oxydant, servant de comburant, se présente sous la forme d'un sel minéral cristallisé et finement broyé (nitrate ou perchlorate d'ammonium). A ces produits de base sont ajoutés d'autres corps destinés à stabiliser le produit, à lui donner de bonnes caractéristiques mécaniques ou à l'empêcher de vieillir.

Les blocs de poudre ont des formes variées (voir *figure* 78) qui sont conditionnées par la forme de la chambre de combustion et par la loi de poussée (progressive, dégressive, constante) en fonction du temps que l'on désire obtenir. La combustion se développe par couches concentriques et il est donc possible de faire varier la surface offerte à la combustion en fonction du temps.

La mise en forme des blocs de poudre est réalisée de diverses manières : extrusion à la presse, moulage dans un moule ou coulée directe dans la chambre de combustion.

La résistance mécanique des blocs de poudre doit être suffisante pour résister au choc du démarrage et à la pression des gaz sans se casser.

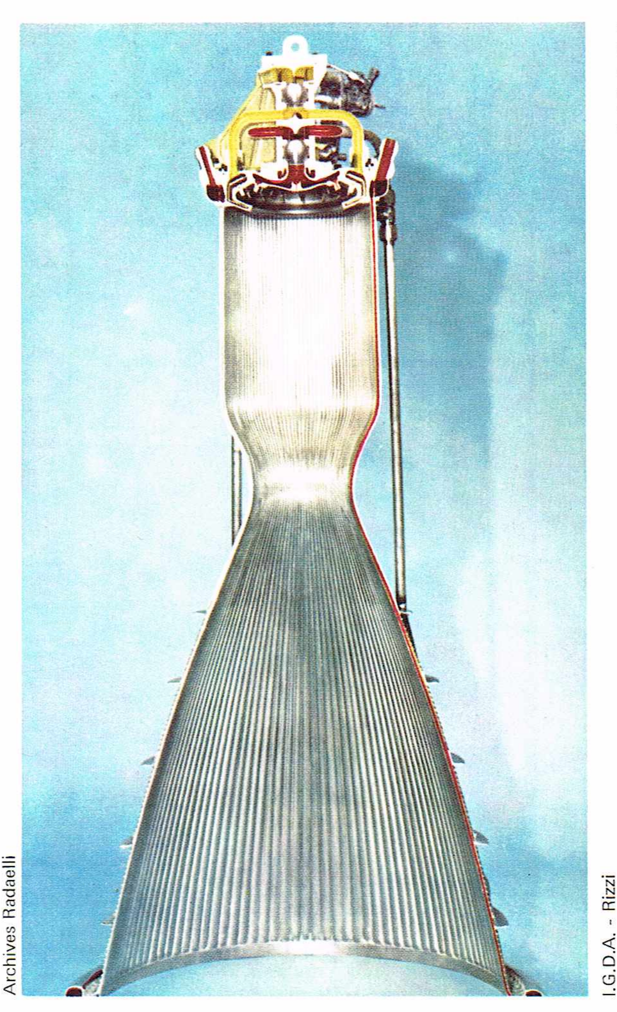
Les allumeurs doivent être conçus pour faire démarrer la combustion sur la totalité de la surface du bloc de poudre de façon que celle-ci puisse atteindre rapidement un régime stable.

L'arrêt de poussée du moteur se réalise simplement par ouverture du fond du propulseur. Des tuyères tournées vers l'avant peuvent être utilisées pour inverser la poussée, ce qui est utile dans le cas de séparation du moteur et de la fusée. Ces opérations sont réalisées par des systèmes de ruptures pyrotechniques (boulons explosifs).

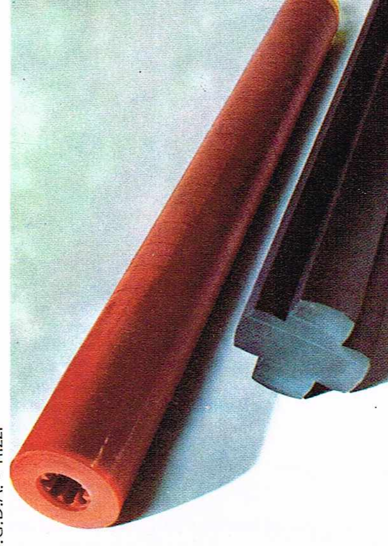
* *Moteurs-fusées à propergol liquide*

Ces fusées comportent, en plus de la chambre de combustion et des tuyères, des fusées à poudre, des réservoirs, des circuits d'alimentation, un système d'injection. La complexité de ces fusées est donc plus grande que celle des fusées à poudre (*fig.* 79).

Les réservoirs ont une place importante de par leur volume et leur poids. On s'efforce de rendre ces réservoirs aussi légers que possible pour une contenance donnée. La forme sphérique, la meilleure de ce point de vue, est quelquefois utilisée ; plus généralement, ces réservoirs sont cylindriques. On utilise des matériaux à hautes caractéristiques mécaniques : aciers, alliages légers ou matériaux composites à fibre de verre. Ces réservoirs sont compartimentés pour éviter les effets de carène liquide.

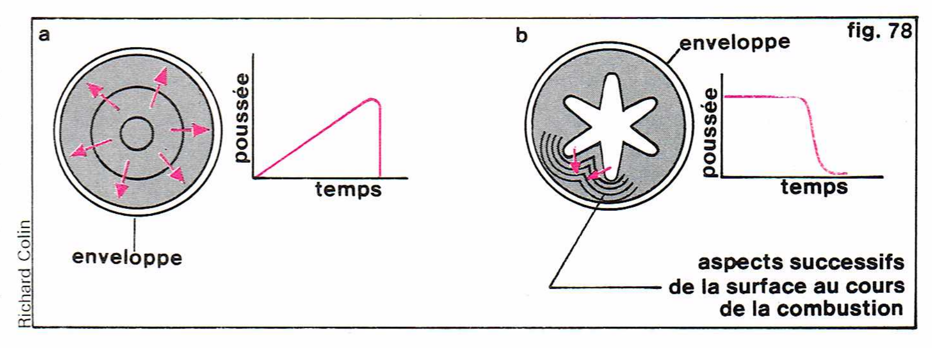

Archives Radaelli

◀ ***Section de la chambre de combustion d'un moteur-fusée à propergol liquide, montrant le flux d'alimentation du carburant.***

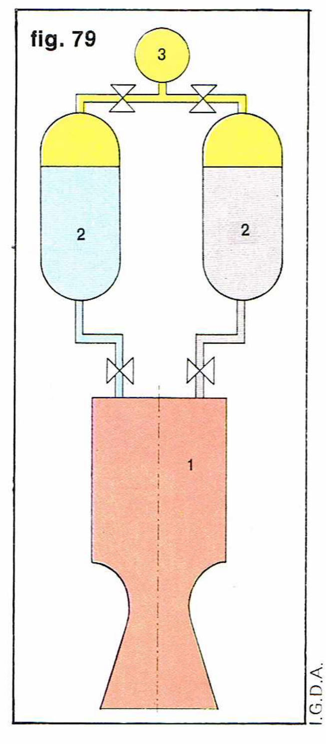

I.G.D.A. - Rizzi

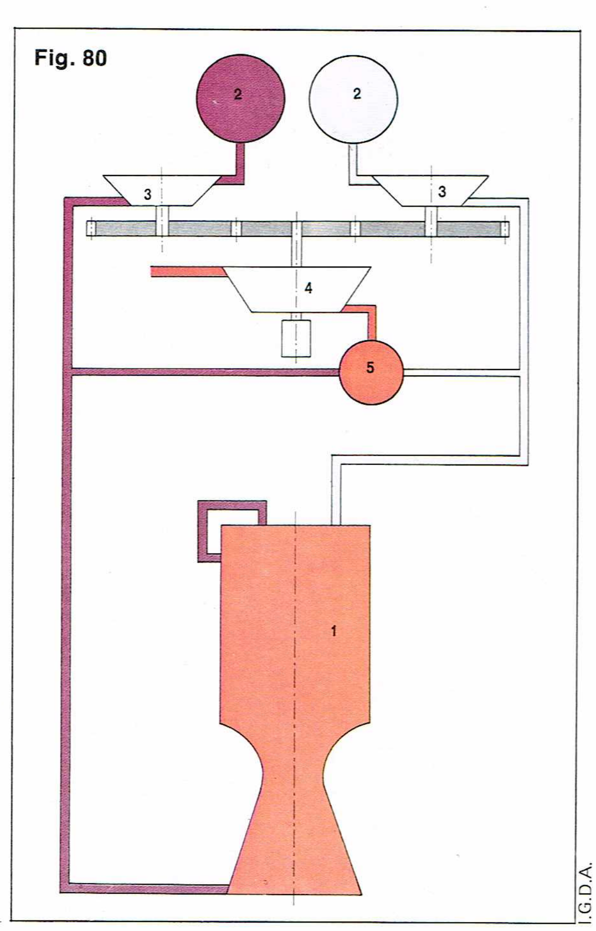
▲ ***Deux types de propergol solide.***

▼ ***Figure 78 ; coupe schématique de deux blocs de poudre montrant deux formes de la chambre de combustion : (a) cylindrique ; (b) en étoile, ce qui permet le réglage de la surface de combustion et par suite de la poussée.***



Richard Colin





▲ *Figure 79 ; schéma d'un moteur-fusée à propergols liquides pressurisés : 1, chambre de combustion ; 2, réservoirs pressurisés de propergol ; 3, réservoir de gaz pressurisé.*

▶ *Figure 80 ; schéma d'un moteur-fusée à propergols liquides alimenté par turbopompe : 1, chambre de combustion ; 2, réservoirs de propergols ; 3, turbopompe d'alimentation ; 4, turbine ; 5, chambre de combustion auxiliaire.*

Le déplacement des ergols vers la chambre de combustion utilise deux grands principes.

— *Chasse par gaz sous pression :* c'est une solution simple. Le gaz de manœuvre peut être soit du gaz sous pression de 100 à 250 bars, stocké à bord du véhicule dans des bouteilles, soit un gaz fabriqué à bord par combustion d'un solide ou d'un liquide. La première solution est plus lourde à cause des bouteilles de stockage ; dans la seconde, les gaz ne doivent pas réagir avec les ergols.

— *Pompage par turbopompe :* les ergols sont confinés dans leur réservoir par des turbopompes qui les refoulent dans la chambre de combustion. La turbine d'entraînement est alimentée par des gaz chauds fabriqués par combustion comme dans le cas de la chasse par gaz. Cette solution de groupe turbopompe est employée sur les grosses fusées, car le poids relatif du groupe par rapport à l'ensemble de stockage devient plus faible et avantage alors cette solution (*fig.* 80).

L'injecteur a pour mission, comme dans tout moteur thermique, de pulvériser les ergols à leur entrée dans la chambre de combustion. Le mélange des deux ergols doit être convenablement effectué avant l'injection.

Le foyer est le résultat, là encore, d'un compromis entre le poids qui doit être le plus bas possible, ce qui conduit à un faible volume, et la qualité de combustion qui exige un grand volume. La tenue des matériaux pose de difficiles problèmes, car la température des gaz peut atteindre 3 000 °C et presque tous les matériaux connus fondent à cette température. Des dispositions particulières de refroidissement doivent donc être prévues : circulation d'un des ergols en double paroi ou projection d'un film liquide (ergol) sur les parois.

L'ensemble formé par l'injecteur, la chambre de combustion ou foyer et la tuyère, est souvent désigné par le vocable *éjecteur.*

L'allumage est un problème difficile, car, compte tenu de l'énergie du propergol, une réaction explosive peut se produire et détruire l'éjecteur. Il faut donc une parfaite synchronisation de l'allumage avec l'injection des ergols.

Les diergols sont des couples formés d'un oxydant et d'un combustible se présentant sous forme liquide (voir *tableau* IX).

Les plus utilisés sont les suivants.

● *Oxydants*

— *Oxygène liquide :* il permet de grandes vitesses d'éjection et une température de combustion élevée.

C'est un produit bon marché et les gaz de combustion ne sont ni toxiques, ni corrosifs. Son stockage n'est pas très facile (ébullition à — 183 °C).

— *Acide nitrique :* il présente sensiblement les mêmes caractéristiques que l'oxygène. C'est un produit bon marché. Il est très corrosif et sa mise en œuvre demande des précautions.

— *Péroxyde d'azote* (N_2O_4) : c'est aussi un excellent oxydant qui a l'avantage de pouvoir se stocker simplement.

— *Perhydrol,* qui est de l'eau oxygénée (H_2O_2) concentrée.

● *Combustibles*

Ils sont nombreux. Tous les *hydrocarbures* peuvent être utilisés, avec l'oxygène en particulier. On utilise aussi l'*essence de térébenthine,* l'*alcool éthylique,* l'*hydrazine,* l'*aniline,* etc. Le meilleur combustible est l'*hydrogène liquide,* dont les performances sont très élevées. Il pose cependant de sérieux problèmes de stockage en raison de son point très bas d'ébullition (— 253 °C). Sa manipulation est dangereuse en raison des risques d'explosions qu'elle entraîne.

Les mono-ergols sont utilisés avec un catalyseur qui provoque la combustion. On utilise comme mono-ergols l'eau oxygénée et l'hydrazine. La mise en œuvre des mono-ergols est difficile, car ces produits sont peu stables.

Il est possible de faire fonctionner un moteur-fusée avec des *triergols* (3 liquides stockés dans 3 réservoirs différents) mais, en raison de la complexité que prendrait un tel dispositif, eu égard aux avantages attendus, aucun moteur de ce type n'a été réalisé.

* *Moteurs-fusées à lithergol*

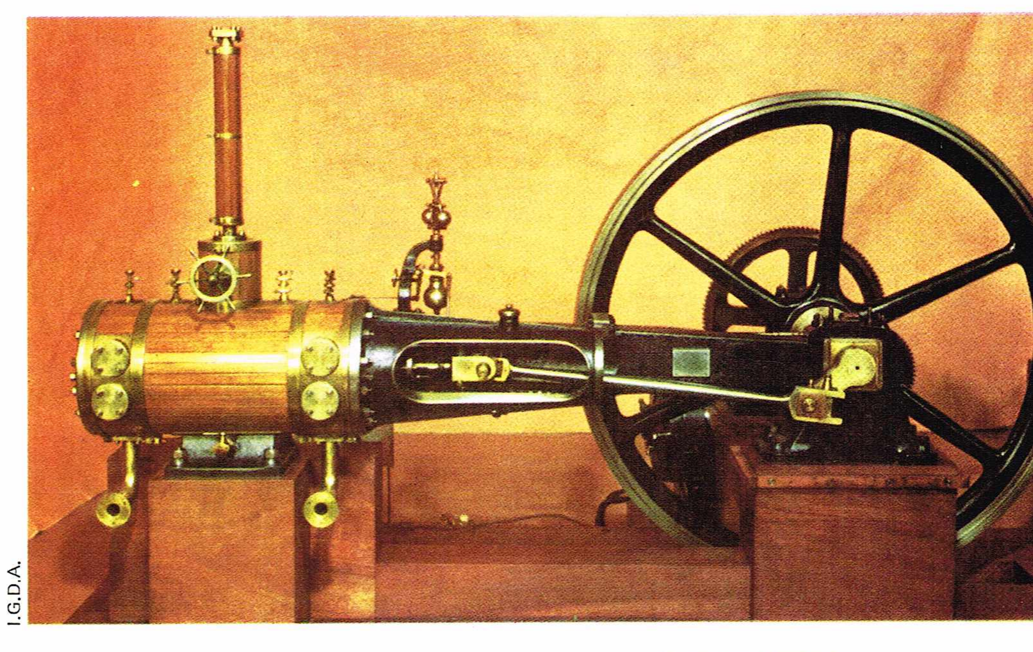
Comme on l'a déjà indiqué, il s'agit d'un moteur encore expérimental utilisant un ergol liquide et un ergol solide. L'oxydant est généralement sous forme liquide, stocké dans un réservoir. Le combustible de forme solide est stocké dans la chambre de combustion. L'injection de l'oxydant dans cette chambre permet d'enclencher la combustion.

L'avantage de ce propulseur est de pouvoir arrêter et remettre en route le moteur, et même de façon automatique si le lithergol utilisé est hypergolique (les 2 ergols s'enflammant par simple contact). Dans un lithergol, on peut marier les propergols liquides et solides, et réaliser ainsi des couples très intéressants sur le plan des performances. Ce type de moteur est donc peut-être appelé à se développer.

Tableau IX

Caractéristiques de quelques propergols pour une pression au foyer de 20 kg/cm² et un rapport de détente de 20

Oxydant			Combustible			Rapport de mélange optimum	Température de combustion	Vitesse d'éjection	Densité
Nom	Formule chimique	Masse moléculaire	Nom	Formule chimique	Masse moléculaire				
Oxygène liquide	O_2	32	Ammoniac	NH_3	17	0,77	2 770 °C	2 460 m/s	0,88
			Hydrazine	N_2H_4	32	1,35	3 030 °C	2 600 m/s	1,06
			Diméthyl-hydrazine	$(CH_3)_2N_2H_2$	60	0,72	3 180 °C	2 540 m/s	0,96
			Kérosène	$C_{10}H_{20}$	140	0,45	3 250 °C	2 480 m/s	0,98
			Hydrogène liquide	H_2	2	0,25	2 730 °C	3 360 m/s	0,28
Fluor	F_2	38	Ammoniac	NH_3	17	0,36	4 150 °C	2 840 m/s	1,14
			Hydrazine	N_2H_4	32	0,55	4 210 °C	2 880 m/s	1,29
			Kérosène	$C_{10}H_{20}$	140	0,35	3 950 °C	2 580 m/s	1,19
			Hydrogène liquide	H_2	2	0,13	3 600 °C	3 540 m/s	0,45
Acide nitrique	HNO_3	63	Ammoniac	NH_3	17	0,46	2 330 °C	2 150 m/s	1,12
			Hydrazine	N_2H_4	32	0,81	2 730 °C	2 390 m/s	1,26
			Kérosène	$C_{10}H_{20}$	140	0,24	2 840 °C	2 150 m/s	1,30


I.G.D.A.

▲ *Machine à vapeur Farcot, type Corliss, réalisée vers 1890. La motrice à vapeur dont l'emploi s'est concentré dans la première moitié du XXe siècle sur la traction ferroviaire a aujourd'hui presque totalement disparu.*

Moteurs à combustion externe

Le fonctionnement de ces moteurs pose tout d'abord la question de nature du fluide de travail. Quel *fluide « caloporteur »* utiliser entre la chaudière, lieu de la combustion où s'effectue la conversion d'une certaine forme d'énergie (chimique, nucléaire, électrique ou rayonnante) en énergie thermique, et le moteur ? Pour des raisons de simplicité et de coût, on sait que l'eau et sa vapeur ont joué et jouent encore un rôle primordial dans l'histoire de la conversion thermomécanique. Cette situation est si bien établie qu'on ne voit pas comment elle pourrait changer dans un avenir immédiat, compte tenu du poids des infrastructures dans l'évolution d'une technologie. A côté de la vapeur d'eau qui tient la première place, il faut citer l'air qui, pour les mêmes raisons d'abondance et de coût, est utilisé sur les turbines à gaz. Quand ces dernières sont couplées avec des réacteurs nucléaires, on préfère alors utiliser l'hélium, gaz stable vis-à-vis du rayonnement. D'autres fluides ont été utilisés sur des installations très spécifiques, mais ces applications restent très marginales.

Cycle ouvert ou cycle fermé ? Cette question, remarquons-le tout d'abord, ne se pose pas pour le moteur. Celui-ci reçoit un fluide disposant d'un contenu énergétique élevé et le restitue après détente, c'est-à-dire après lui avoir prélevé l'énergie mécanique récupérable. Ce qui se passe avant et après la conversion thermomécanique ne le concerne pas. Il s'agit en fait d'un problème d'économie de l'ensemble chaudière-moteur. Les premières machines à vapeur fonctionnaient en cycle ouvert. Progressivement, en particulier avec l'augmentation de puissance des machines, on a utilisé des cycles fermés.

Machine alternative à vapeur

Les machines alternatives à vapeur, ou machines à vapeur à piston, ont disparu aujourd'hui de notre environnement familier. Durant la première moitié du XXe siècle, leur emploi s'est concentré sur la locomotive. Puis, dans la période qui a suivi la Seconde Guerre mondiale, la traction électrique d'abord et la propulsion par moteurs à combustion interne ensuite ont chassé sans rémission les derniers modèles du genre. On peut même dire que les coûts considérables d'électrification d'un réseau, d'une part, et l'arrivée tardive des moteurs à combustion interne dans la traction ferroviaire, d'autre part, ont prolongé la vie de ce moteur thermique qui sans cela aurait disparu beaucoup plus tôt.

En fait, la machine à vapeur à piston a été condamnée dès le début du XXe siècle par l'avènement de l'électricité. La production de cette dernière exige en effet des vitesses élevées pour entraîner les génératrices (1 500 ou 3 000 t/mn). Les machines à vapeur à piston, mal adaptées aux vitesses rapides, étaient donc tout à fait incapables de résister à la concurrence des turbines à vapeur pour le développement des fortes puissances. Dans le bas de la gamme, les moteurs électriques, plus légers, plus propres, plus silencieux, ne pouvaient aussi que prendre l'avantage.

Aujourd'hui, l'aptitude dont dispose ce type de moteur à fournir des puissances notables à vitesse réduite sans disposition particulière fait qu'il est encore utilisé dans la propulsion navale et, à ce titre, un paragraphe lui sera consacré. Mais ces machines encore en service de nos jours sont les témoins d'une époque révolue ; ce sont des « fossiles vivants », pour utiliser le vocabulaire du paléontologiste.

Disons également qu'il nous paraissait difficile de supprimer complètement la machine à vapeur à piston de cette encyclopédie, étant donné le rôle historique considérable qui fut le sien dans la naissance et le développement de la société industrielle. Grâce à elle, l'homme a pu disposer à discrétion comme jamais auparavant d'énergie en quantités importantes. Autre mutation, la conduite de ces machines a introduit dans le monde technologique de l'époque l'autorégulation. Le régulateur à boules de Watt a été un point de départ décisif pour l'automatisation des machines. On connaît tous les développements qui suivirent.

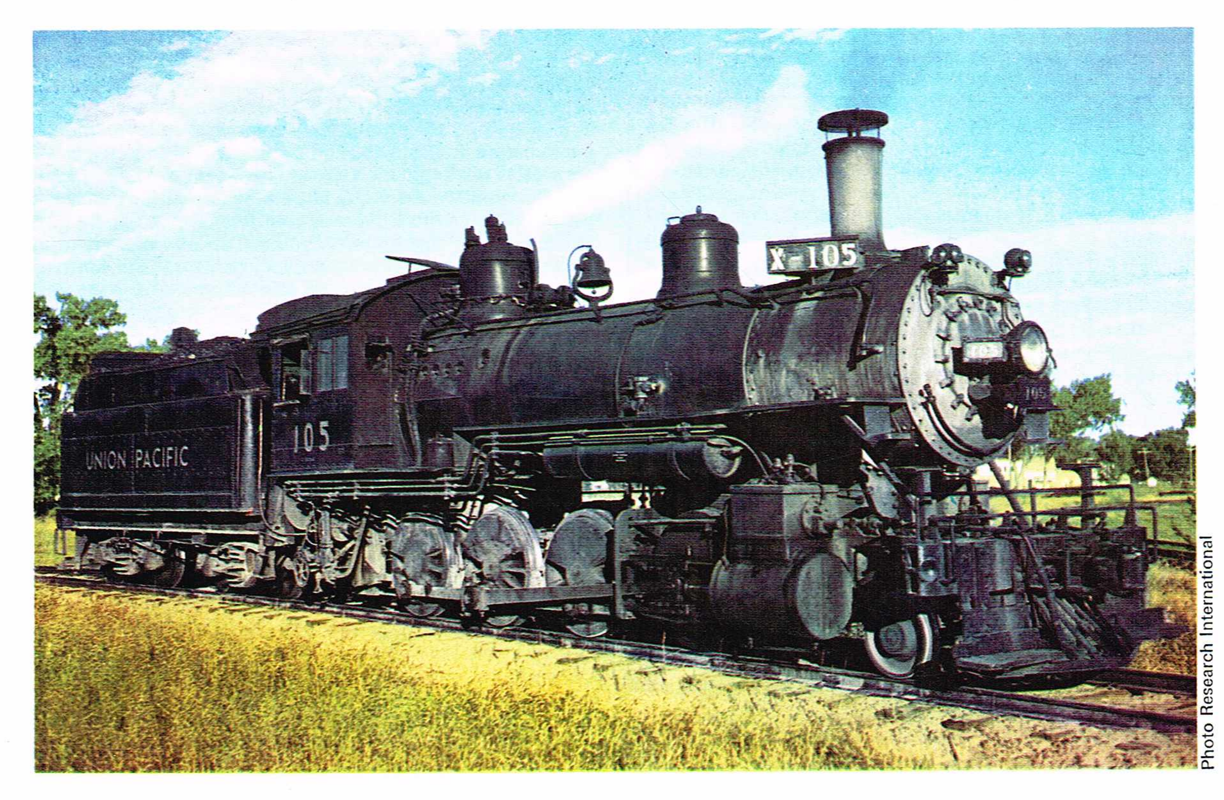
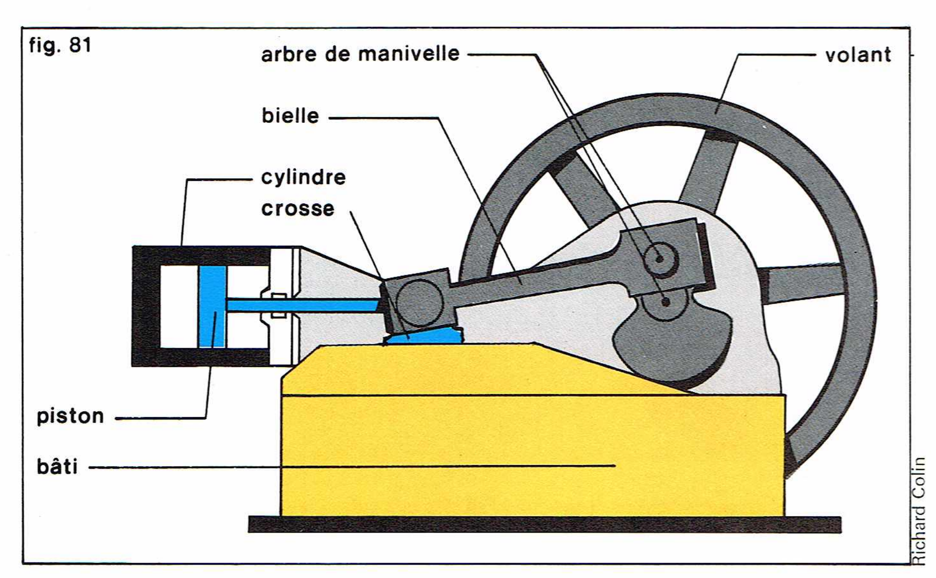
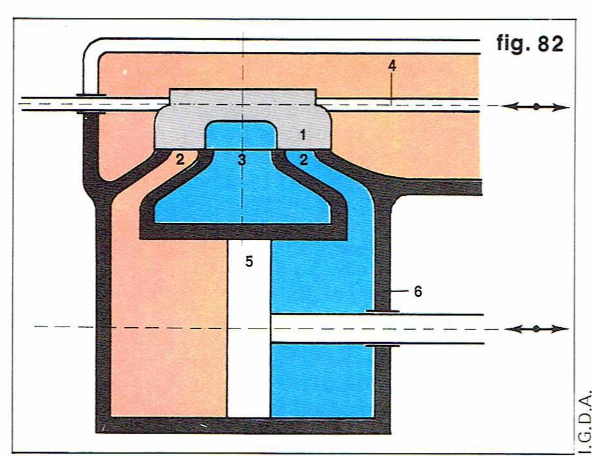


Photo Research International

◀ *Un modèle de locomotive à vapeur en service vers 1890-1900 dans les chemins de fer américains.*

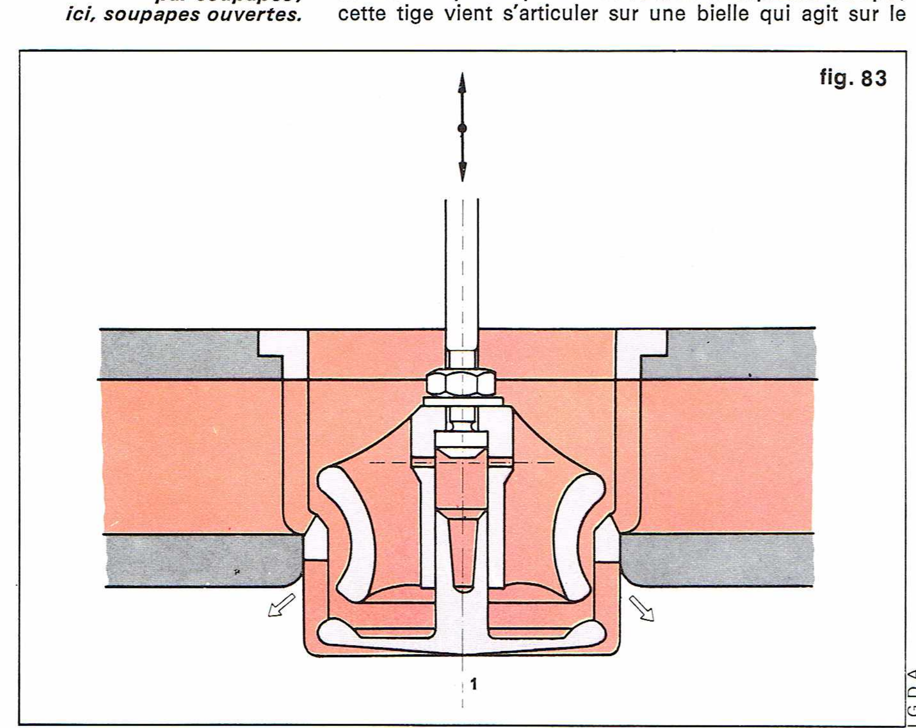


▲ *Figure 81 : représentation schématique d'une machine à vapeur simple.*



▶ *Figure 82 : distribution à tiroir simple : 1, tiroir ; 2, conduits en communication avec les extrémités du cylindre ; 3, échappement ; 4, tige de commande ; 5, piston ; 6, cylindre.*

▼ *Figure 83 : système à distribution par soupapes ; ici, soupapes ouvertes.*



Description sommaire et fonctionnement

Le modèle le plus simple que peut prendre une machine à vapeur est celui de la *figure* 81. Dans un cylindre se déplace un piston sur lequel on fait agir la vapeur, alternativement sur chacune des deux faces. Le piston porte une tige qui traverse le cylindre par un orifice muni d'un presse-étoupe ; cette tige vient s'articuler sur une bielle qui agit sur le maneton de l'arbre moteur. Le pied de bielle porte une crosse qui coulisse dans des glissières. Les extrémités du cylindre ont des orifices pour l'admission et l'échappement de la vapeur. Ainsi présentée, la machine à vapeur à piston ressemble à un moteur à combustion interne double effet.

Le fonctionnement du moteur est alors intuitif. Si on admet la pression de vapeur sur un côté du cylindre et si dans le même temps on met l'autre côté en communication avec l'échappement, le piston va se mouvoir dans le sens de l'effort créé par la vapeur ; et on conçoit qu'une commande judicieusement synchronisée des obturateurs permette le fonctionnement régulier du moteur.

Pour cette commande des obturateurs, qu'on appelle *distribution* comme sur les moteurs à combustion interne, deux systèmes sont utilisés : le système à tiroir et le système à soupape.

Dans le *système à tiroir*, il existe sur le côté du cylindre une capacité qui reçoit la vapeur de la source chaude et qui est en communication par deux conduits avec les extrémités du cylindre. Un troisième conduit en liaison avec le condenseur vient déboucher dans la capacité entre les deux premiers sur une surface plane, parfaitement usinée (appelée *glace*). Le tiroir en forme de coquille se déplace sur la glace pour réaliser les opérations d'admission et d'échappement (voir *figure* 82). Le tiroir plan, très utilisé au début de la machine à vapeur, a été ensuite remplacé par des tiroirs cylindriques de forme plus rationnelle. Pour donner au tiroir le mouvement de va-et-vient d'amplitude convenable, on le commande par un système bielle-manivelle sur l'arbre moteur, à côté de la manivelle principale.

Le *système de distribution par soupapes* rappelle les dispositifs utilisés sur les moteurs à combustion interne (arbre à cames). Les réglages des différentes phases de la distribution étant plus facilement réalisables par ces dispositifs, la distribution par soupapes est en général préférée sur les gros moteurs (*fig.* 83).

Cycle thermodynamique

Sur le diagramme de Clapeyron (p, v) le cycle thermodynamique théorique, tel que nous l'avons décrit précédemment, se présente pour un côté du cylindre sous la forme d'un rectangle ABCD, construit de deux isobares : p_0 (pression d'échappement) et p_1 (pression de vapeur) et de deux isochores. Le travail par tour se calcule aisément :

$$W = 2\,\pi\,D^2/4\,(p_1 - p_0)\cdot C$$

avec D diamètre du cylindre et C longueur de la course.

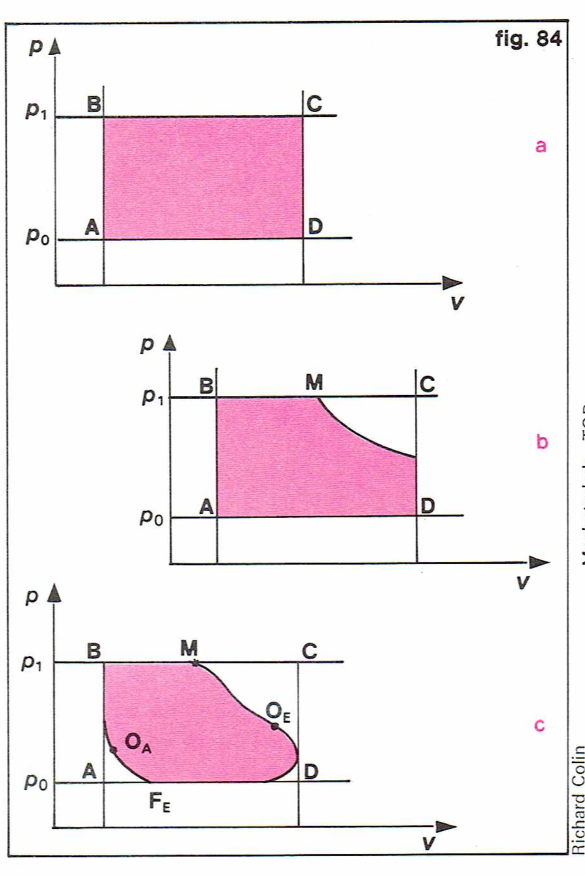
Mais, dans ce cycle, on n'utilise pas la détente de la vapeur, ce qui conduirait, si on fonctionnait ainsi, à une consommation prohibitive de vapeur. Pour faire travailler la vapeur, on ferme l'admission après une fraction de la course (point M) et la vapeur déjà admise va continuer à exercer sa pression tout en détendant. Si le point M est au milieu du segment BC, on va économiser la moitié du débit vapeur, alors que la perte sur la surface du cycle est de 15 % environ. La pression d'échappement ne peut être celle de l'atmosphère comme sur les locomotives à vapeur, mais on gagne notablement en utilisant un condenseur, car la pression d'échappement peut être alors ramenée à 0,1 bar. Contrairement aux turbines à vapeur, le gain dans cette voie est vite limité par suite de l'impossibilité de donner aux orifices d'échappement des dimensions suffisantes.

Pour finir avec la régulation, ajoutons que, pour donner un fonctionnement satisfaisant, il faut prévoir une avance à l'ouverture de l'échappement (point O_E) pour que la pression dans le cylindre tombe franchement avant la course de retour. On anticipe également l'avance à la fermeture de l'échappement (point F_E) et l'avance à l'admission (point O_A) pour que le cylindre soit déjà bien rempli au point mort. Ces ajustements de la régulation donnent donc au diagramme réel la forme générale indiquée sur la *figure* 84.

En fait, le diagramme réel tel qu'on peut le mesurer sur une machine se présente suivant la courbe en pointillé de la même figure. Les différences constatées ont différentes origines :

— pertes par espace mort ;

— perte par effet de parois, la détente n'est donc plus adiabatique ;





— pertes par laminage à l'admission et à l'échappement.

Pour diminuer l'importance de ces pertes, les solutions sont :

— le fractionnement de la détente en plusieurs cylindres, ce qui réduit l'effet des espaces morts ;

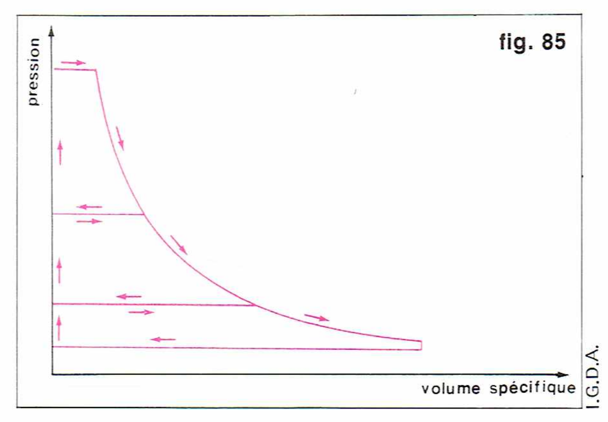
— le réchauffage des parois à la vapeur pour limiter les échanges thermiques entre celles-ci et la vapeur motrice ;

— l'amélioration des tracés des conduits d'admission et d'échappement pour réduire les pertes par laminage.

Compte tenu du gain réalisé par le fractionnement de la détente et en dépit de la complexité qu'elle ajoute, la quasi-totalité des machines à vapeur à piston en service aujourd'hui est à « expansion multiple ».

Le diagramme d'un cycle théorique à trois expansions est représenté sur la *figure* 85. On constatera l'importance de la détente permise, chaque cylindre n'en prenant qu'une fraction.

Par ailleurs, comme on le verra plus loin dans l'étude des cycles de turbines à vapeur, il est intéressant d'utiliser de la vapeur surchauffée pour éviter une humidité trop grande de la vapeur en fin de détente, la solution idéale étant de la resurchauffer en cours de détente. Rien ne s'oppose à l'utilisation de la surchauffe et de la resurchauffe sur les machines à vapeur à piston.



Richard Colin

Domaine d'application

La machine à vapeur alternative n'est pratiquement plus utilisée que dans le domaine de la propulsion navale. Jusqu'à une puissance de 4 000 chevaux, elle peut concurrencer les autres moyens de propulsion, bien que son rendement soit en général plus faible. Son gros avantage réside dans la facilité avec laquelle elle fonctionne à faible vitesse, ce qui la destine particulièrement aux navires qui effectuent beaucoup de manœuvres : remorqueurs, caboteurs, chalutiers, cars et trains ferries, engins de servitude, etc.

Les machines les plus simples comportent deux cylindres. Sur les moteurs plus poussés, le nombre de cylindres est de trois habituellement, quatre au maximum. Il est intéressant d'utiliser de la vapeur surchauffée et même resurchauffée.

On a déjà noté la difficulté d'utiliser à plein la faible pression du condenseur, car il devient impossible de placer sur le cylindre basse pression des orifices d'échappement de taille suffisamment grande. Pour diminuer cette perte, on a pensé à faire échapper le dernier cylindre de la machine alternative dans une turbine à vapeur. Les deux machines sont alors couplées sur la même ligne d'arbre, un réducteur étant introduit entre la turbine et la machine alternative. La turbine est débrayée pendant les manœuvres : elle est utilisée en marche normale pour améliorer le rendement. Cette solution présente de plus l'avantage de stabiliser la ligne d'arbre lorsque l'hélice s'emballe par gros temps.

D'autres systèmes ont été également imaginés pour éviter le couplage mécanique de la turbine de récupération de la vapeur d'échappement avec le groupe principal constitué par la machine à piston. Sur certains systèmes, la turbine fonctionne sur l'échappement BP (basse pression) et entraîne un compresseur à vapeur qui comprime la vapeur d'échappement HP (haute pression) avant son admission dans le cylindre MP (moyenne pression). La turbine peut également servir à entraîner une génératrice électrique dont le courant est disponible pour les besoins du bord ou pour alimenter un réchauffeur de vapeur entre corps HP et corps MP à résistances électriques.

La lubrification des pistons sur leur chemise exige que de l'huile de graissage soit introduite dans les cylindres. Ce graissage est en général effectué par pompe individuelle pour chaque cylindre, comme sur les gros moteurs Diesel. Cette huile, entraînée par la vapeur, se retrouve dans l'eau alimentaire et risque donc, si on n'y prend pas garde, d'être introduite dans la chaudière. Les circuits d'alimentation des installations utilisant des machines alternatives comportent donc toujours sur le circuit d'alimentation de la chaudière des filtres importants pour fixer l'huile de graissage des cylindres, ce qui est une sujétion de ce type d'installation.

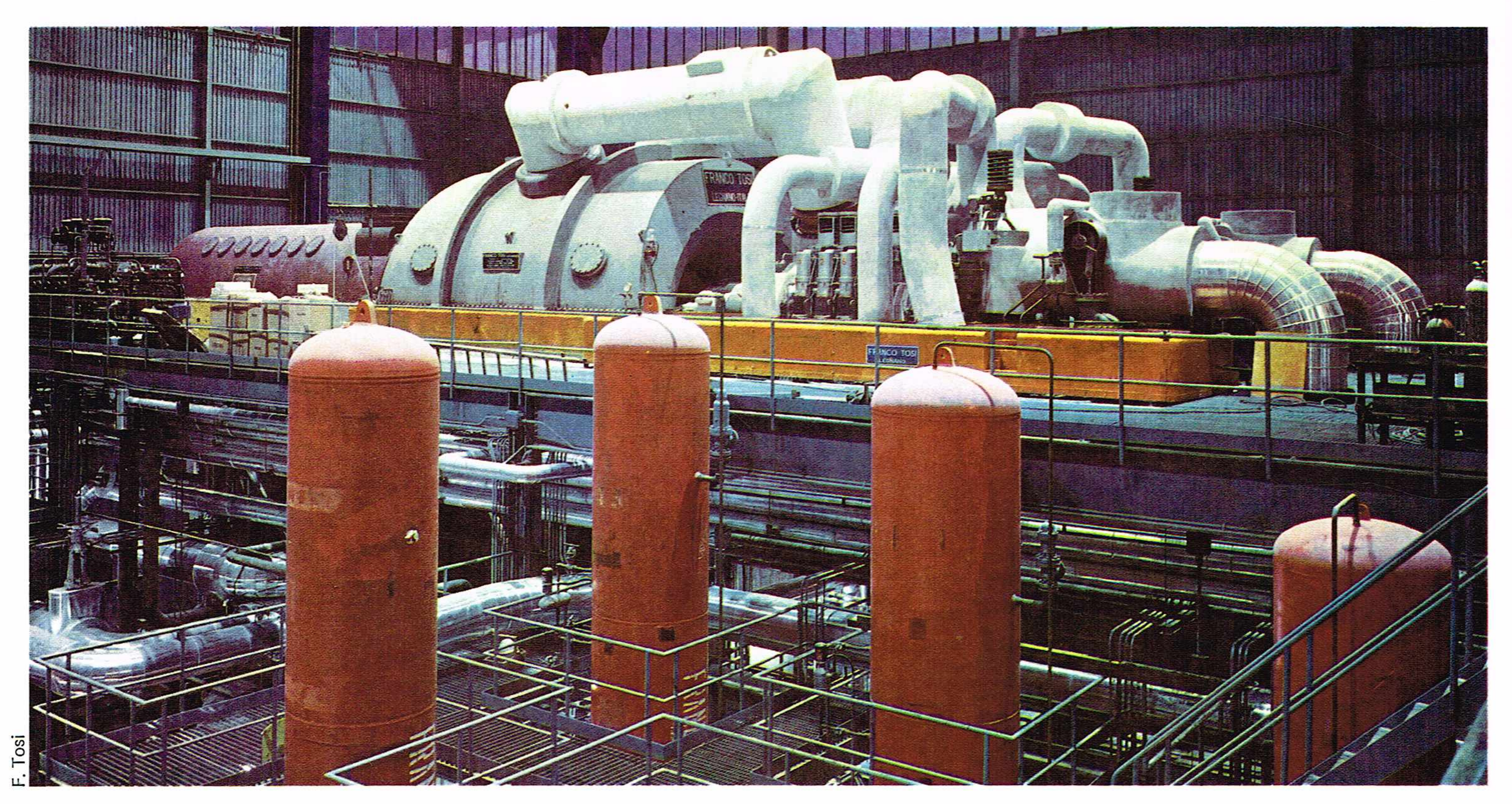
Turbines à vapeur

La turbine à vapeur est un moteur thermique qui permet de convertir en énergie mécanique l'énergie contenue dans la vapeur d'eau. Cette vapeur a été en général produite

▲ ***La machine à vapeur alternative n'est pratiquement plus utilisée que dans le domaine de la propulsion navale, comme ici sur les remorqueurs.***

◄ ***Figure 84 : diagrammes théoriques sans détente de vapeur*** (a), ***avec détente de vapeur*** (b) ***et diagramme réel*** (c).

◄ ***Figure 85 : diagramme d'un cycle théorique à trois expansions dans une motrice à détente fractionnée.***



F. Tosi

▲ *Turbine à vapeur en service dans une centrale classique : au premier plan, les réchauffeurs haute pression du poste d'eau alimentaire.*

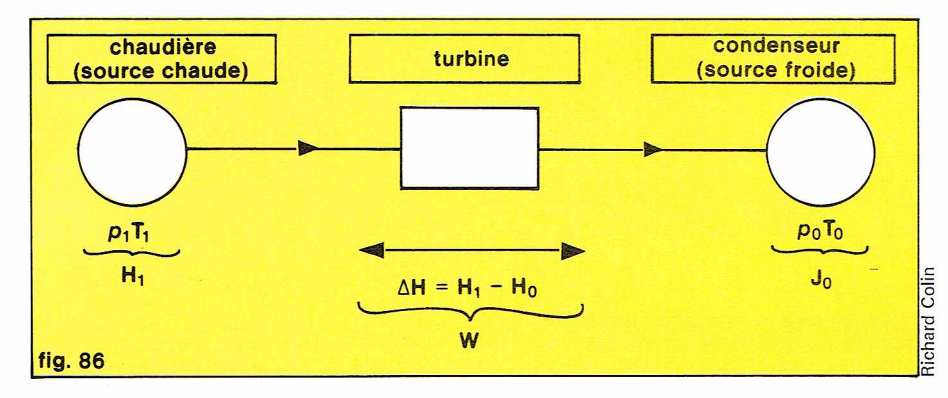
dans une chaudière par vaporisation de l'eau ; elle peut être surchauffée ou simplement saturée. Elle tire donc son énergie du « combustible » (fossile, nucléaire, etc.) utilisé par la chaudière. Cette énergie est contenue dans la vapeur sous forme d'énergie thermique mais aussi d'énergie mécanique (pression).

On a vu dans les rappels thermodynamiques du chapitre consacré à la conversion thermodynamique que la somme de ces deux formes d'énergie était représentée par l' « enthalpie ». Cette fonction d'état s'exprime en kcal/kg ou en kJ/kg et dépend uniquement de la pression et de la température.

Une turbine peut donc être représentée par le schéma simplifié de la *figure* 86. Placée entre une source chaude et une source froide, elle réalise une chute d'enthalpie ΔH. La façon dont se fait la conversion thermomécanique dans ce type de machines sera examinée plus loin.

L'idée d'utiliser la « force » de la vapeur pour produire du travail était déjà connue, d'après les historiens, dès l'Antiquité. Il a fallu cependant attendre les thermodynamiciens du XIX[e] siècle pour que cette idée simple puisse prendre corps et se développer. Les grandes dates de cette évolution peuvent se résumer ainsi. Le Suédois De Laval construit, en 1883, la première turbine ; celle-ci ne comportait qu'un étage à « action » et tournait à 30 000 t/mn. La puissance fournie était de quelques chevaux. A la même époque, en 1884, l'Anglais Parsons présente un modèle différent : sa machine est une turbine à « réaction » à plusieurs étages, tournant à 18 000 t/mn et fournissant une puissance de 10 chevaux. Les termes d'action et de réaction seront explicités plus loin.

▼ *Figure 86 : représentation schématique d'une turbine à vapeur.*



Le départ est donné, et au début du XX[e] siècle, il existe déjà de nombreuses machines, mais leur puissance ne dépasse pas encore 10 MW. Vers 1907, la société suisse Brown-Boveri associe les deux procédés dans une même machine et la puissance des turbines peut encore être augmentée. Les progrès de la turbine à vapeur avaient donc été considérables en une période de temps relativement courte. On pensait alors que ces machines étaient très certainement les plus grosses qui pouvaient être construites et, pour cette raison, on les appelait « turbines limites ». L'histoire du développement des machines est truffée de ce genre de présomptions où l'ingénieur-inventeur, contrairement aux idées reçues, sous-estime ses capacités créatrices plus qu'il ne les surestime.

La suite montra qu'on pouvait faire beaucoup mieux. Associés avec les constructeurs de chaudières, car la turbine est très dépendante des caractéristiques de la vapeur qui l'alimente, les « turbiniers » augmentèrent par étapes successives le rendement des machines et leur puissance unitaire. Il serait trop long de retracer cet itinéraire pourtant passionnant. Aujourd'hui cette puissance unitaire a dépassé le million de kilowatts, et les techniques actuelles ne semblent pas limitées à ce niveau de puissance.

Si la machine alternative à vapeur a été le moteur du XIX[e] siècle, la turbine à vapeur est celui du XX[e] siècle. Sans elle, le développement de l'électricité aurait été très limité. Son rôle a également été décisif dans le développement de l'industrie et de la propulsion navale.

Description élémentaire d'une turbine

Dans une turbine à vapeur (et à gaz), le fluide en mouvement est compressible et il se détend dans la machine en traversant une série d'aubages dont les uns sont fixes et les autres mobiles. Ces aubages peuvent être considérés comme une succession de modules qu'on appelle des étages, comprenant chacun :

— une partie fixe ou distributeur, de forme circulaire, composée de tuyères ou d'aubages ;

— une roue mobile comportant à sa périphérie en regard du distributeur des aubages ou ailettes.

Le fluide en mouvement traverse en se détendant les aubages fixes et mobiles des étages successifs. Une turbine comprend en général de nombreux étages.

Leur nombre est fonction de l'importance de la détente réalisée dans la turbine. On ne peut en effet utiliser une détente importante dans un seul étage, car cela donnerait une très grande vitesse de vapeur et en conséquence des

F. Tosi

▲ ***Rotor avec ses ailettes d'une turbine à condensation et à pression hypercritique.***

vitesses circonférentielles d'aubages mobiles tout à fait inadmissibles. Les parties fixées sont réunies entre elles et constituent le *stator;* les parties mobiles sont solidaires d'un arbre appelé *rotor*.

Dans la turbine décrite ci-dessus, l'écoulement de la vapeur se fait suivant un cylindre coaxial avec la turbine. On dit qu'il s'agit d'une *turbine axiale*. Si l'écoulement de la vapeur se fait perpendiculairement à l'axe de la turbine, c'est une *turbine radiale*. On ne parlera ci-après que des turbines axiales, car ce sont de loin les plus répandues. Il existe quelques types de turbines radiales, dont le plus connu est celui construit par la firme suédoise *Ljung Strom*.

En amont de la turbine, on trouve des éléments de robinetterie qui permettent le réglage du débit de vapeur. L'échappement est en général raccordé directement au condenseur (turbine à condensation). Sur certaines turbines, on limite la détente dans la machine pour pouvoir disposer à l'échappement d'une source de vapeur pour des applications basse pression (turbines à contre-pression). Des prélèvements de vapeur sont fréquemment effectués en cours de détente pour le réchauffage de l'eau d'alimentation de la chaudière ou pour tout autre usage indépendant de la marche de la turbine (turbines à soutirage ou à prélèvement).

Une turbine comporte enfin des auxiliaires qui permettent d'effectuer la régulation de la machine, son graissage et l'étanchéité du corps de la turbine au passage de l'arbre.

Étude de la turbine à vapeur

La détente de la vapeur dans la turbine se fait en deux phases qui correspondent aux étapes suivantes :

— conversion de l'énergie thermique de la vapeur en énergie cinétique ;

— transformation de cette énergie cinétique en énergie mécanique disponible sur un arbre.

La détente peut s'effectuer uniquement dans les distributeurs fixes. On dit alors que la machine est une *turbine à action*. La transformation de l'énergie cinétique en énergie mécanique se fait ensuite dans les aubages mobiles (*fig.* 87).

La détente peut à l'opposé ne s'effectuer que dans les aubages mobiles. Il s'agit alors d'une *turbine à réaction pure*. L'énergie cinétique engendrée dans ces aubages mobiles est, dans ce cas, directement transformée en énergie cinétique. Les turbines à réaction n'ont jamais été utilisées. Il y a toujours fractionnement de la détente entre les aubages fixes et les aubages mobiles. On définit un degré de réaction comme le rapport entre la chute d'enthalpie dans les aubages mobiles et la chute totale d'enthalpie dans l'étage.

Dans les turbines utilisant ce principe, le degré de réaction est voisin de 0,5 et on les appelle *turbines à réaction*.

Les turbines modernes combinent souvent ces deux modes de fonctionnement qui vont être examinés, ci-après, plus en détail.

* *Turbine à action*

Tout écoulement passant au travers d'aubages peut se représenter par un triangle de vitesse (voir *figure* 88).

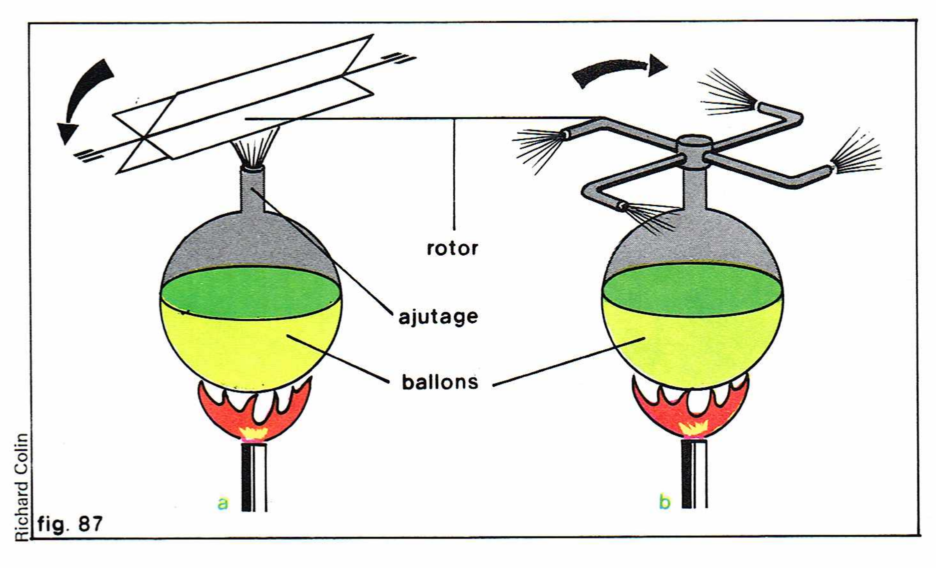
V est la vitesse absolue de la vapeur par rapport aux aubages fixes de la turbine.

W est la vitesse relative de la vapeur par rapport aux aubages mobiles (celle qu'enregistrerait un observateur tournant avec la roue).

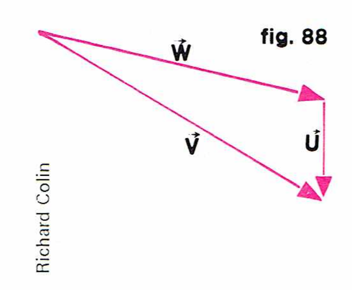
U est la vitesse circonférentielle des aubages mobiles.

Ces trois vecteurs vitesse se combinent de la façon suivante : en tout point, la vitesse absolue de la vapeur est la somme géométrique de sa vitesse relative et de la vitesse circonférentielle des aubages mobiles :

$$\vec{V} = \vec{W} + \vec{U}$$



▼ ***Figure 87; les deux modes de fonctionnement d'une turbine :***
a) à action;
b) à réaction.



Richard Colin

▲ Figure 88 ; triangle de vitesses dans une roue de turbine $\vec{V} = \vec{W} + \vec{U}$: $\vec{V}$, vitesse absolue de la vapeur ; $\vec{W}$, vitesse relative de la vapeur ; $\vec{U}$, vitesse circonférentielle de la roue.

L'application de cette relation à un étage de turbine à action supposé parfait (pas de choc ni de frottement) conduit aux triangles de vitesses de la *figure* 89. L'évolution de la pression et de la vitesse absolue dans les aubages a été également indiquée. On voit que, dans les aubages fixes dont la section est variable, il y a eu détente de la vapeur de p_0 à p_1, ce qui entraîne une augmentation de la vitesse absolue de V_0 à V_1. Dans l'étage mobile de section constante, la pression ne varie plus : $p_1 = p_2$, et comme il n'y a pas de détente dans cet aubage, la vitesse d'écoulement de la vapeur y reste également constante : $W_1 = W_2$. Mais la vitesse absolue de la vapeur décroît et passe de V_1 à V_2. Pour qu'il n'y ait pas de choc, à l'entrée des aubages, il faut que le profil d'entrée de l'aubage mobile soit tangent à W_1. Si la vapeur à la sortie de l'étage mobile devait pénétrer dans un distributeur fixe, il faudrait que le profil d'entrée de ses aubages fixes fût tangent à V_2.

L'observation des triangles de vitesse permet de voir comment, du fait de la courbure de l'écoulement, se réduit la vitesse absolue de la vapeur de V_1 à V_2. Cette réduction est le signe apparent de la transformation d'énergie cinétique de la vapeur en énergie mécanique. Si on se rappelle que l'énergie cinétique d'un corps ou d'un fluide en mouvement est proportionnelle au carré de sa vitesse $\left(E = \frac{1}{2} m V^2\right)$, l'échange d'énergie est proportionnel à la différence :

$$V_1^2 - V_2^2$$

* *Turbine à réaction*

Il a déjà été indiqué que les machines à réaction pure n'existaient pas. On décrira donc ci-après un étage de turbine de degré de réaction 0,5 (voir *figure* 90).

La détente est fractionnée en deux parties égales :
— de p_0 à p_1 dans les aubages fixes ;
— de p_1 à p_2 dans les aubages mobiles.

La vitesse absolue de la vapeur croît de V_0 à V_1 dans les aubages fixes et décroît de V_1 à V_2 dans les aubages mobiles. Contrairement à ce qui se passait dans la turbine à action, la vitesse relative de la vapeur augmente dans les étages mobiles $W_2 > W_1$, du fait de la détente qui s'y produit.

La transformation de l'énergie cinétique en énergie mécanique s'effectue de façon analogue à celle indiquée ci-dessus pour les turbines à action, à une différence portant sur la poussée axiale sur les aubages mobiles. Négligeable sur la roue d'une turbine à réaction, cette force prend sur la turbine à réaction une valeur notable du fait de l'augmentation progressive de la vitesse relative de la vapeur dans l'aubage (de W_1 à W_2) qui conduit à un profil dissymétrique. Pour annuler cette poussée, les rotors des grosses turbines se présenteront sous la forme de deux séries d'étages montées en opposition (double flux).

* *Turbine à éléments multiples*

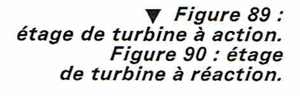
Il a déjà été noté qu'une turbine devait comporter un certain nombre d'étages. Deux procédés sont possibles pour éviter la vitesse très élevée à laquelle devrait tourner une turbine à roue unique pour s'adapter aux vitesses de vapeur que l'on obtiendrait.

Le premier procédé consiste à diviser la chute totale d'enthalpie en un certain nombre *n* de chutes partielles. La turbine sera donc constituée de *n* étages en série, qui peuvent fonctionner à action ou à réaction. On appelle cette machine une *turbine à étages de pression*.

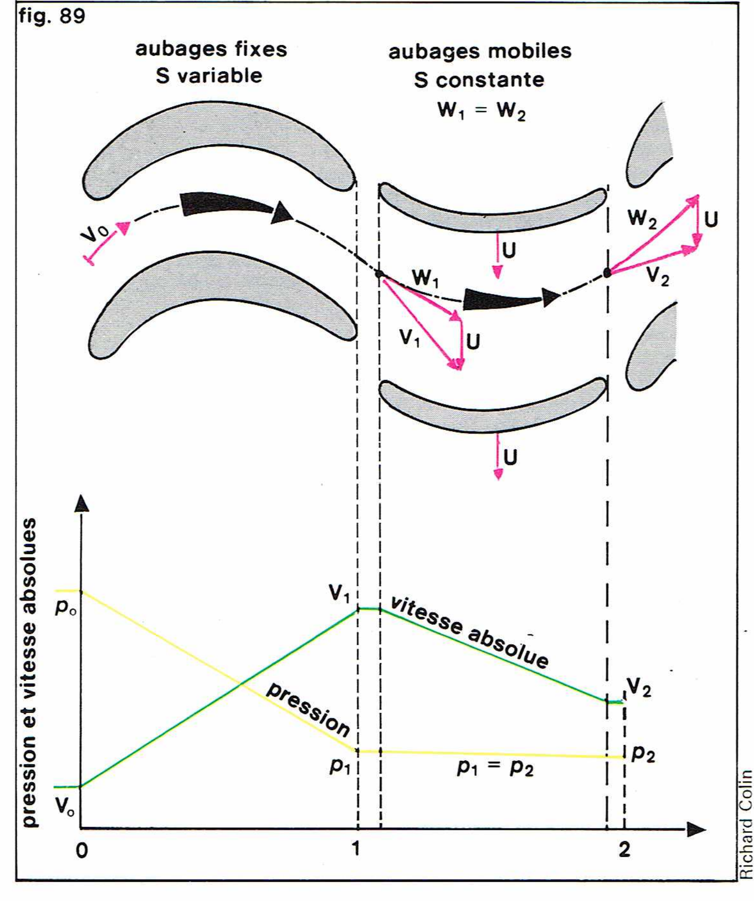
Le deuxième procédé consiste à effectuer dans un seul distributeur la chute totale d'enthalpie.

Cette détente unique confère à la vapeur une très grande vitesse qui va être utilisée dans *n* roues, chacune d'elles abaissant progressivement la vitesse. Cette machine, appelée *turbine à étages de vitesse*, ne peut être évidemment que du type à action. Pour une même détente, le calcul montre qu'il faut plus d'étages de pression que d'étages de vitesse. Ces derniers paraissent donc plus intéressants mais, en pratique, il faut limiter à deux ou trois le nombre des étages fonctionnant suivant ce principe en raison des pertes par frottement dans les aubages. Autre inconvénient : la puissance développée est mal répartie entre les étages successifs. Elle est très forte sur le premier étage et décroît ensuite rapidement. Pour ces différentes raisons, la turbine à action à étages de vitesse n'est utilisée que pour réaliser des puissances faibles.

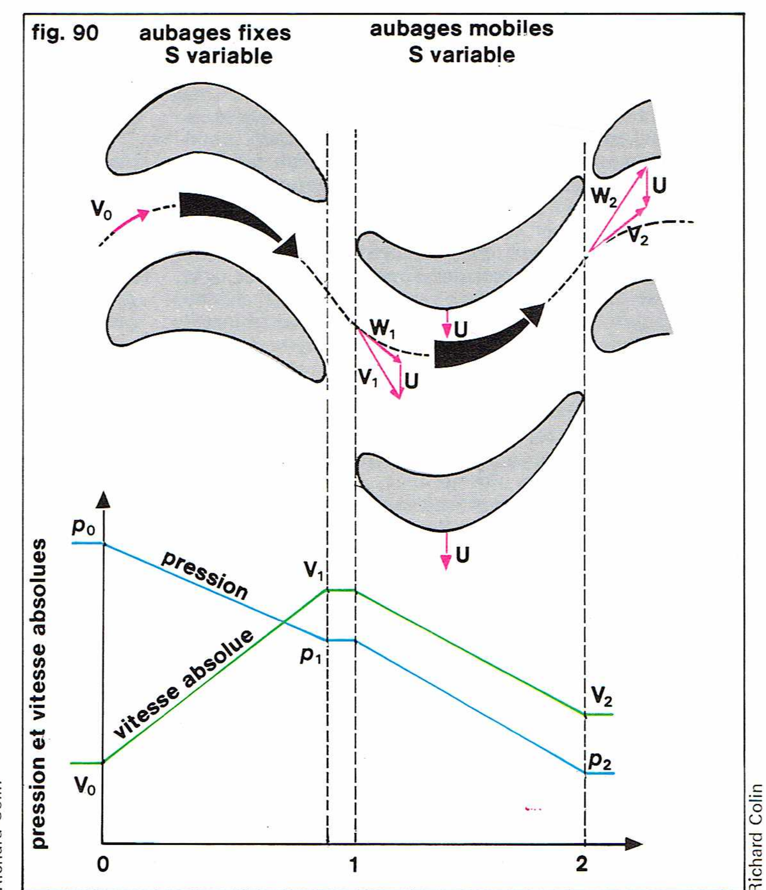
Les turbines de moyenne et grande puissance sont à étages de pression. La détente est fractionnée en autant de parts qu'il y a d'étages. Le degré de réaction des aubages est variable dans la machine et diffère selon les constructeurs.



▼ Figure 89 : étage de turbine à action. Figure 90 : étage de turbine à réaction.



Richard Colin



Richard Colin

Pertes et rendement des turbines

Dans l'étude sommaire de la turbine à vapeur qui précède, on a supposé que la turbine était parfaite. On entend par là que l'écoulement se produit sans choc, ni frottement sur les parties fixes et mobiles, et que la seule perte à considérer est celle par vitesse restante à l'échappement. En réalité, la conversion d'énergie thermique en énergie mécanique dans les turbines réelles s'accompagne de pertes importantes. On peut les classer ainsi :

— les *pertes dans les aubages :* ces pertes ont essentiellement pour origine les frottements et les chocs du fluide sur les parois;

— les *pertes internes :* on peut ici distinguer les fuites internes de vapeur par le bord des aubages, les pertes par humidité de la vapeur qui ralentit le rotor (et érode aussi les dernières ailettes), et les pertes par ventilation;

— les *pertes externes :* dues à la mauvaise isolation thermique de la turbine, aux fuites de vapeur vers l'extérieur, aux frottements dans les paliers, à l'entraînement des auxiliaires de la turbine;

— *les pertes par vitesse restante* (pour mémoire).

Les performances d'une turbine peuvent être appréciées de différentes façons, ce qui permet d'établir des comparaisons entre les machines.

* *Consommation spécifique de vapeur*

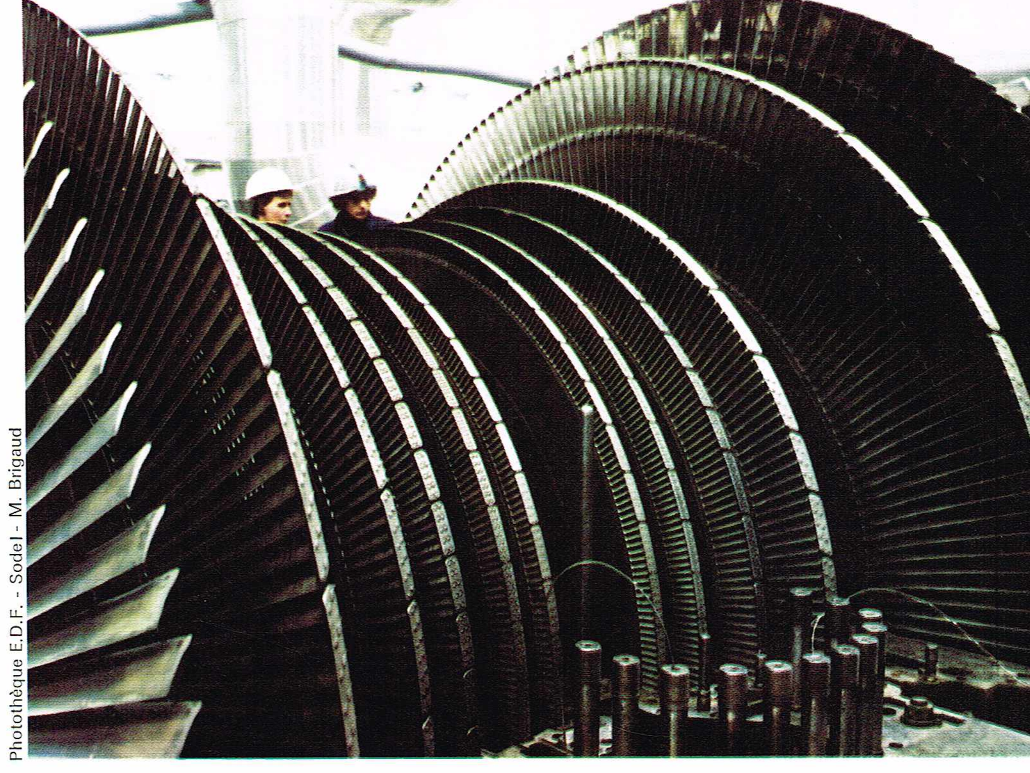
C'est la quantité de vapeur utilisée par la turbine pour produire une unité de travail mécanique. Cette consommation s'exprime en kilogramme de vapeur par kilowatt-heure (kg/kWh).

Ce rapport est intéressant pour fixer la capacité de la chaudière qui doit alimenter la turbine. Il ne convient pas pour comparer les turbines entre elles, car il ne prend pas en compte les caractéristiques de la vapeur. Il est mesuré sur les installations comme indicatif du bon fonctionnement de la machine.

* *Consommation spécifique de chaleur*

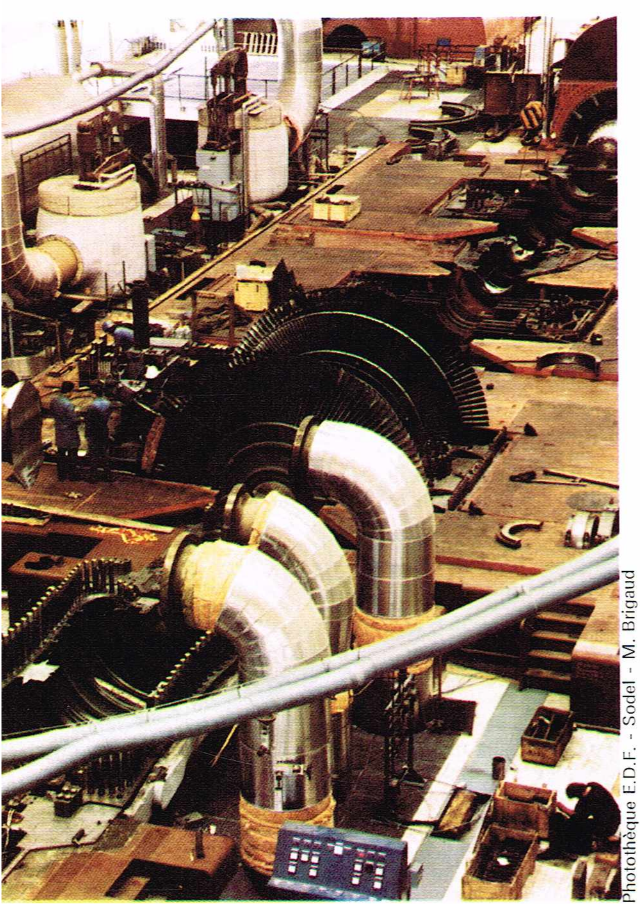
C'est la quantité d'énergie thermique nécessaire pour produire une unité de travail mécanique. Cette consommation s'exprime en kilocalories par kilowatt-heure.

Ce rapport traduit la qualité de la conversion d'énergie de chaleur (kcal) en travail (kWh) et permet de comparer les turbines entre elles. Il apparaît donc comme l'inverse du rendement de la turbine.



Photothèque E.D.F. - Sodel - M. Brigaud

▲ ***Détail d'un rotor « basse pression » de la turbine, tranche 1, de la centrale nucléaire de Fessenheim.***



Photothèque E.D.F. - Sodel - M. Brigaud

◀ ***Montage de la turbine de la centrale de Fessenheim.***

* *Rendement de la turbine*

Ce rendement prend donc en compte toutes les pertes de la machine énumérées ci-dessus et c'est celui qui intéresse l'utilisation de la machine. Il est directement relié à la consommation spécifique de chaleur :

$$\eta = \frac{860}{C_s}$$

C_s, consommation spécifique en kcal/kWh.

On parle de rendement brut (et par conséquent de consommation brute de vapeur) si on ne prend en compte que les auxiliaires de la turbine et de rendement net (et de consommation nette), si on tient compte de la puissance de pompage de l'eau alimentaire.

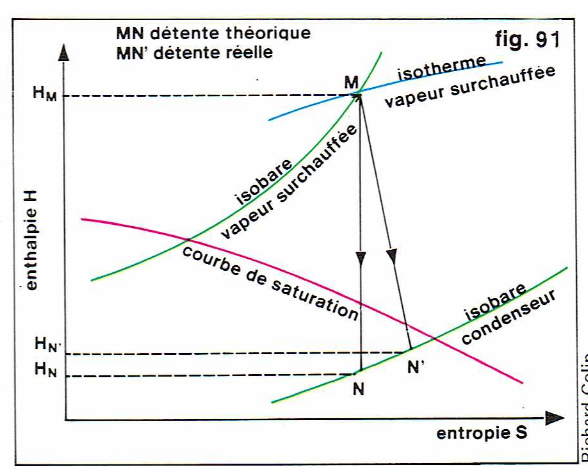
Le constructeur cherche à comparer sa turbine réelle à la turbine parfaite qui travaillerait dans les mêmes conditions. Ce rapprochement peut s'effectuer à l'aide du rendement thermodynamique défini comme suit.

* *Rendement thermodynamique*

La détente se produit théoriquement (voir *figure* 91) de façon isentropique entre le point M défini par les conditions de pression et de température de la source chaude et la courbe isobare correspondant à la pression du condenseur, soit la ligne MN. En fait, l'énergie thermique se dégrade dans la turbine, ce qui se traduit par une croissance de l'entropie, et la ligne réelle de détente est représentée par MN'. On voit que la variation d'enthalpie se réduit de $(H_M - H_N)$ à $(H_M - H_{N'})$. Le rendement thermodynamique traduit cette dégradation :

$$\eta_{th} = \frac{H_M - H_{N'}}{H_M - H_N}$$

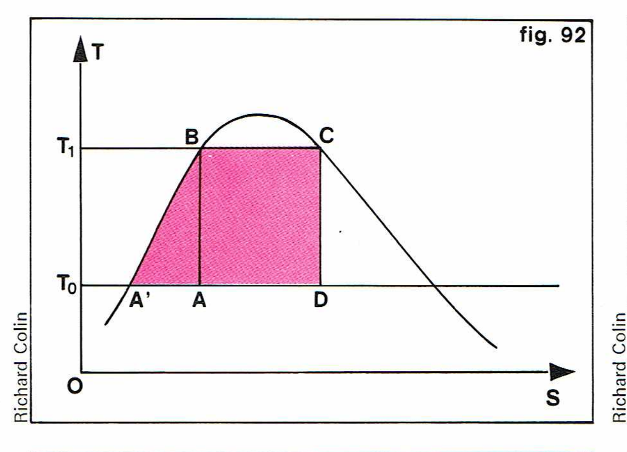
Ce rendement varie avec les caractéristiques de la vapeur. Il est différent dans chacun des étages de la turbine.

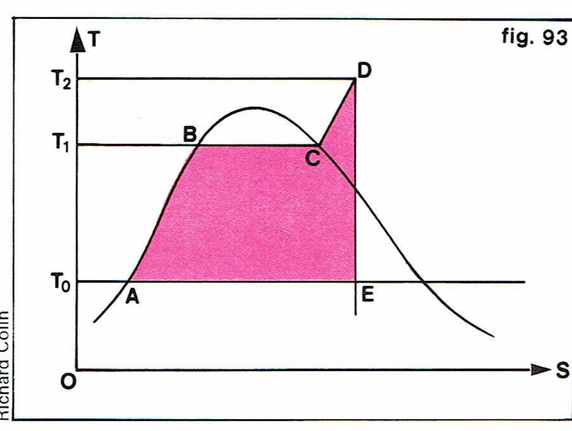


Richard Colin

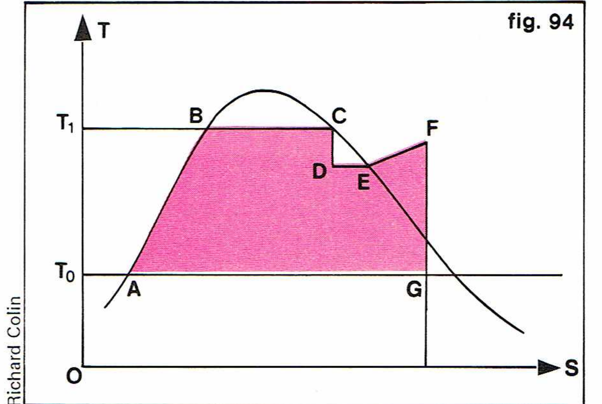
◀ ***Figure 91 : détente de la vapeur dans une turbine représentée sur un diagramme de Mollier.***

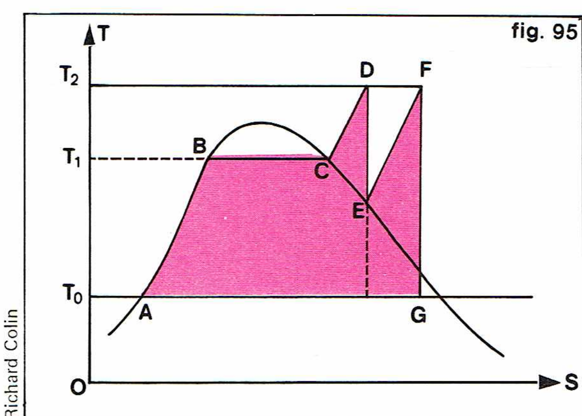
▶ *Figure 92 : cycles de Carnot* (ABCD) *et de Rankine* (A'BCD) *représentés sur le diagramme entropique. Figure 93 : cycle avec surchauffe de la vapeur* (T_2) *sur le diagramme entropique.*





▶ *Figure 94 : cycle nucléaire d'un réacteur PWR représenté sur le diagramme entropique. Figure 95 : cycle de Hirn à resurchauffe représenté sur le diagramme entropique.*





Cycles - Rendement global

Pour décrire le cycle complet suivi par la vapeur, il faut considérer l'ensemble constitué par la chaudière, la turbine, le condenseur et le circuit alimentaire. Le cycle idéal à utiliser serait évidemment celui de Carnot, dont on a vu qu'il donnait entre une source chaude (T_1) et une source froide (T_0) le rendement maximal (voir *figure* 92).

$$\eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_0}{T_1}$$

Malheureusement ce cycle représenté par le rectangle ABCD est mécaniquement irréalisable et il faut se résoudre à remplacer la transformation AB (qui est une compression isentropique d'une vapeur humide) par l'alimentation de la chaudière en eau froide provenant du condenseur.

Ce nouveau cycle (A'BCD), réalisable pratiquement, est appelé : *cycle de Rankine*. Son rendement est donné par l'expression suivante :

$$\eta_{\text{Rankine}} = \frac{H_C - H_D}{H_C - H_A}$$

H étant l'enthalpie considérée aux points caractéristiques du cycle.

* *Nécessité de la surchauffe et de la resurchauffe*

Pour augmenter la chute d'enthalpie, on peut agir sur les deux points extrêmes de la détente : augmenter la température de la source chaude T_1 et diminuer celle de la source froide T_0. On est vite limité dans ces deux voies. Il n'est guère possible en effet d'augmenter la température de la vapeur car, ce faisant, on augmente l'humidité de la vapeur en fin de détente, et il n'est plus possible de faire fonctionner correctement la turbine. Vers le bas, on est limité par la source froide elle-même : rivière, lac ou mer. Ces considérations expliquent pourquoi les turbines fonctionnant avec de la vapeur saturée en détente directe utilisent de la vapeur qui ne dépasse pas une pression de 20 bars.

Un des moyens d'augmenter la chute d'enthalpie sans trop abaisser l'humidité en fin de détente est d'utiliser la surchauffe de la vapeur, à pression constante, en général la pression de saturation de la chaudière. Le cycle ainsi modifié (voir *figure* 93) s'appelle le *cycle de Hirn*. Son rendement est donné par la formule :

$$\eta_{\text{Hirn}} = \frac{H_D - H_E}{H_D - H_A}$$

Ce rendement est un peu supérieur à celui du cycle de Rankine. La température de surchauffe est limitée par la résistance aux hautes températures des métaux utilisés pour la fabrication des surchauffeurs et des premiers étages de turbines. Cette température ne dépasse pas en général 540 à 560 °C pour des raisons économiques, car les matériaux à mettre en œuvre seraient alors trop coûteux (aciers inoxydables austénitiques). Le cycle de Hirn à une seule surchauffe permet de monter la pression de fonctionnement jusqu'à 80 bars environ.

Sur les centrales nucléaires à eau légère, on utilise un cycle de Rankine avec surchauffe en cours de détente. Ces réacteurs ne délivrent en effet qu'une vapeur saturée (pression de 60 à 70 bars), au mieux légèrement surchauffée sur certains modèles, et l'humidité en fin de détente qui résulterait d'une détente directe provoquerait de sérieuses difficultés sur la marche de la turbine.

En conséquence, après une détente partielle, on procède à un séchage de la vapeur et à une surchauffe effectuée avec de la vapeur vive (on a donc $T_2 < T_1$). Cette surchauffe permet d'obtenir une humidité acceptable de la vapeur en fin de détente. Le cycle correspondant est représenté sur la *figure* 94.

Si l'on veut utiliser des pressions supérieures à 80 bars, il devient nécessaire de prévoir une deuxième surchauffe qu'on appelle « resurchauffe ». En général, la première détente isentropique est arrêtée sur la courbe de saturation de la vapeur. On effectue alors la resurchauffe à une température souvent égale à celle de surchauffe et la vapeur est ensuite détendue jusqu'à la pression du condenseur. C'est le cycle de Hirn à resurchauffe qui est présenté sur la *figure* 95.

Le gain de rendement apporté par la resurchauffe est de l'ordre de 5 %. La contrepartie de ce gain est une augmentation de la complexité de l'installation. Pour cette raison, on n'utilise la resurchauffe que sur des centrales de grande puissance. Rien ne s'oppose en principe à l'idée de resurchauffer deux fois la vapeur. Mais la double resurchauffe entraîne des coûts d'investissement qui ne sont plus en rapport avec le gain qu'elle procure ; elle n'est donc pas utilisée en pratique.

* *Réchauffage de l'eau d'alimentation par soutirage*

On a déjà noté la différence qui existe entre le cycle de Hirn et le cycle de Carnot, et qui vient de l'échauffement

irréversible dans la chaudière de l'eau alimentaire froide en provenance du condenseur. Cette irréversibilité peut être supprimée, théoriquement, par un réchauffage de l'eau alimentaire effectué par une infinité d'échangeurs travaillant à des températures voisines. Ces échangeurs, qu'on appelle des réchauffeurs, eu égard à leur fonction, doivent emprunter leurs calories à la vapeur en cours de détente ayant le même niveau thermique. De cette façon, l'eau injectée dans la chaudière serait à la température de la source chaude T_1, et les échanges avec cette source chaude seraient isothermes (vaporisation).

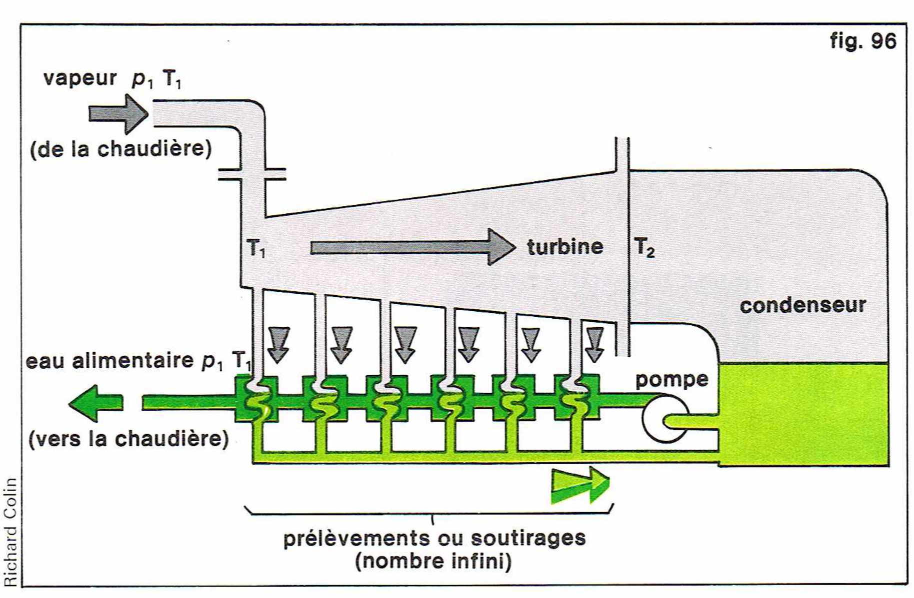
Ce système de réchauffage représenté sur la *figure* 96 n'est pas réalisable pratiquement. On peut l'approcher par une série de réchauffeurs alimentés par de la vapeur prélevée sur la turbine. Le gain sur le rendement est d'autant plus fort que le nombre d'étages de réchauffage est élevé. On en trouvera 4 ou 5 sur les installations de puissance moyenne, et 6, voire 7, sur les centrales de puissance élevée.

Les conséquences sur la turbine sont les suivantes :

— augmentation de la consommation spécifique de vapeur : il faut plus de vapeur à l'entrée pour faire la puissance puisque l'on en soutire en cours de détente ;

— amélioration du rendement de la machine, car les débits sont augmentés dans la partie haute pression de la turbine et diminués dans la partie basse pression, dont le rendement est très sensible à l'humidité de la vapeur ;

— augmentation de la puissance unitaire d'un groupe donné qui est en général limité par la section d'échappement de la vapeur au condenseur.



▲ ***Figure 96 : cycle à prélèvement ou à soutirage.***

Construction des turbines à vapeur

Lorsque la puissance est suffisamment faible, on peut se contenter d'une turbine à un seul étage. Ces machines ont un très mauvais rendement ; aussi, dès que la puissance devient significative, la turbine comprend un nombre plus ou moins important d'étages, et pour les turbines de grande puissance ces étages sont regroupés en plusieurs corps. On distingue le corps haute pression (HP), le corps moyenne pression (MP) et le corps basse pression (BP). Ces corps sont généralement à double flux pour limiter la poussée axiale ; ils peuvent être doublés ou triplés.

Les rotors des différents corps de la turbine sont en général solidaires sur un même arbre pour entraîner la machine réceptrice. Mais ce n'est pas une règle générale : les rotors peuvent être associés sur deux arbres différents qui entraînent soit deux machines réceptrices distinctes, soit le même récepteur après couplage des deux turbines par un réducteur. La solution à deux lignes d'arbre séparées se rencontre sur les centrales de grande puissance ; la solution à réducteur est classique en propulsion navale.

La vitesse de la machine est un compromis entre le désir de faire tourner la turbine à la vitesse la plus élevée possible et le souci d'éviter un réducteur entre celle-ci et la machine réceptrice. Les turbo-alternateurs sont entraînés directement à des vitesses correspondant au synchronisme : 3 000 t/mn ou 1 500 t/mn. Les turbines industrielles qui entraînent des turbomachines comme des pompes ou des compresseurs peuvent tourner à des vitesses plus élevées. Lorsqu'il faut produire une puissance élevée à faible vitesse, le réducteur s'impose.

Les étages des turbines peuvent être du type à action ou du type à réaction. Les constructeurs sont restés longtemps attachés à l'un ou l'autre de ces types. Mais, en pratique, les turbines utilisent ces deux principes. On a vu ci-avant que la pression restait constante dans un aubage mobile à action, alors qu'elle est variable dans un aubage à réaction. Il sera donc plus facile d'éviter les fuites internes avec des étages à action. Les turbines à réaction seront souvent munies en tête d'une roue double à action, et les turbines à action seront dotées d'étages à réaction en fin de détente, le meilleur rendement de ce type d'aubage n'étant plus détruit par les fuites internes.

Il existe deux types de fabrication de rotors (voir *figure* 97), ce qui permet de distinguer deux classes de turbines.

* *Turbines à diaphragmes*

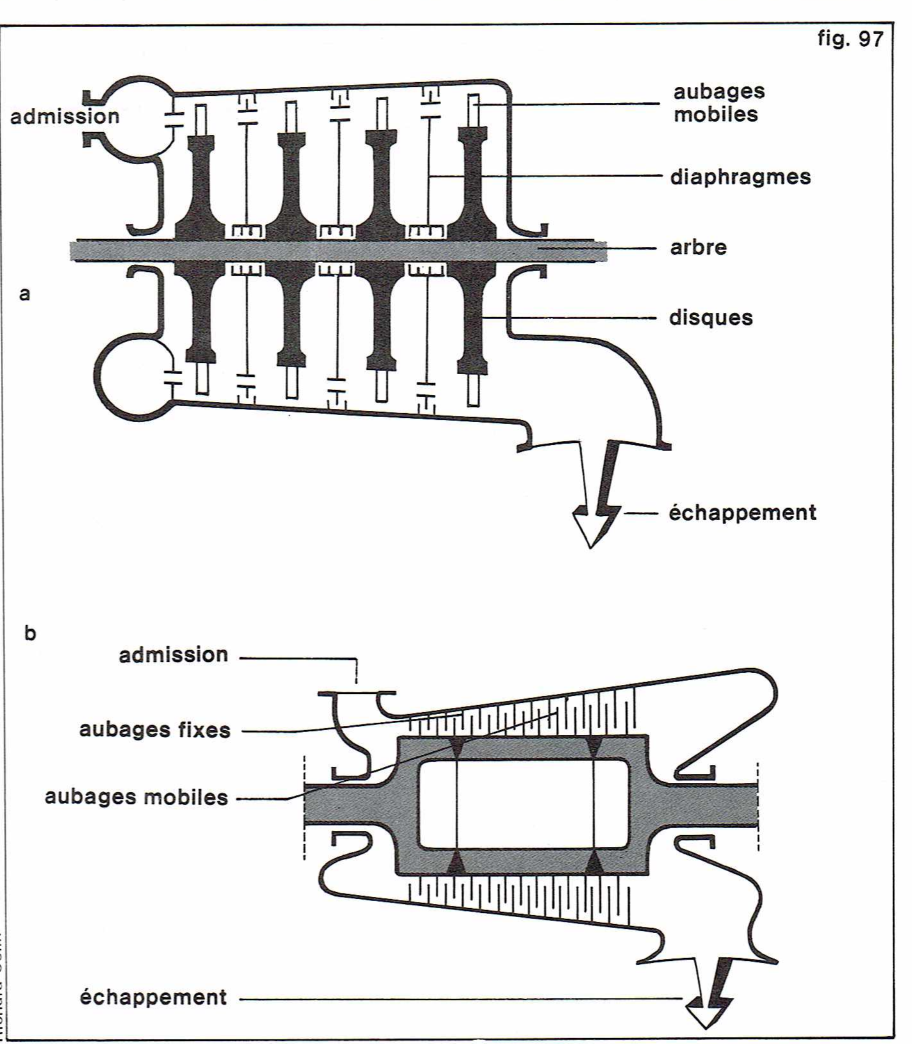
Dans ces turbines, appelées encore à tort multicellulaires, le rotor est formé d'un arbre cylindrique porteur de disques de diamètre croissant. Chaque disque fait partie d'un étage et il y a autant d'étages que le nécessite le fractionnement de la détente. Le rotor peut être monobloc ou assemblé. Les disques sont usinés séparément, puis emmanchés et clavetés sur l'arbre. Ils portent à leur périphérie les aubages mobiles.

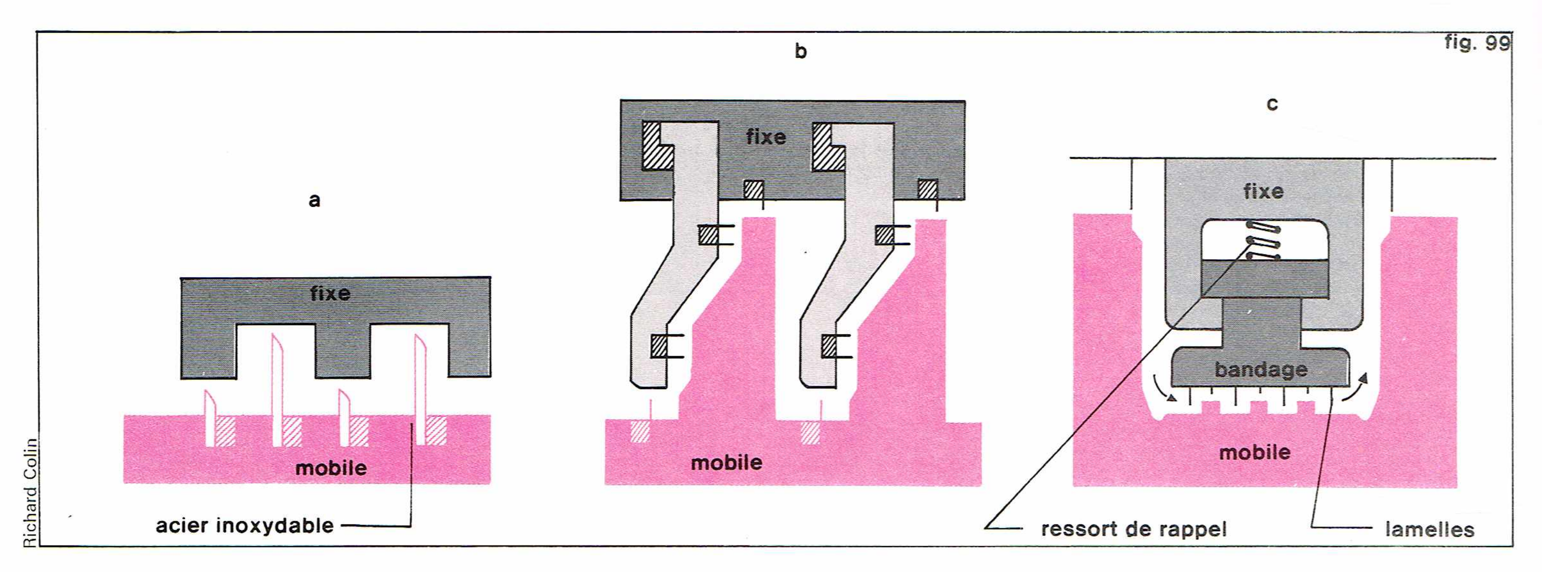
Les disques sont séparés par des cloisons fixes, appelées diaphragmes. Ils portent les aubages des tuyères distributrices et sont tenus par le stator. Ils laissent passer l'arbre en leur centre au travers d'un système d'étanchéité, rendu nécessaire par la différence qui existe entre les deux faces d'un même diaphragme.

* *Turbines à tambour*

Ce type de rotor a la forme d'un cylindre. Les aubages mobiles y sont directement rapportés, les aubages fixes étant portés par le stator. La construction peut être mono-

▼ ***Figure 97 : comparaison des deux types de construction d'une turbine à vapeur :***
a) construction à diaphragmes ;
b) construction à tambours.





▲ *Figure 99 ; dispositifs d'étanchéité : a) labyrinthe à pointes radiales ; b) labyrinthe à pointes radiales et axiales ; c) labyrinthe à segments effaçables.*

bloc : le rotor est obtenu par forgeage. Il peut être aussi obtenu par assemblage ou par soudure de plusieurs éléments.

Dans la turbine à diaphragme, on a noté qu'il fallait limiter les fuites le long de l'arbre. Ici, les fuites vont se produire entre aubages fixes et rotor d'une part, et si l'étage est à réaction entre aubages mobiles et stator d'autre part. Pour les éviter, l'ensemble est monté avec des jeux très réduits.

La conception du rotor à disque convient bien à la turbine à action, alors que la conception à tambour s'adapte mieux à la turbine à réaction. Historiquement, la conception des machines a été déterminée par ces règles pendant longtemps. Il n'en va plus de même à présent. Pour des raisons très diverses, relatives en particulier aux coûts de fabrication et aux moyens à mettre en œuvre, les deux procédés de fabrication sont concurremment employés sur les différents types de turbines.

* *Aubages mobiles*

Ils sont soumis par la force centrifuge à des efforts considérables qui peuvent multiplier leur poids par des facteurs de plus de 10 000. Ces problèmes d'ordre mécanique s'ajoutant aux problèmes hydrodynamiques, on concevra aisément que la conception des ailettes d'une turbine soit particulièrement difficile.

C'est dans le pied de l'ailette que l'effort est maximal, et sa fixation dans le disque ou le rotor doit être particulièrement soignée. On trouvera sur la *figure* 98 les différents types d'accrochage les plus utilisés.

Un autre danger guette les ailettes : celui des vibrations. Des calculs longs et difficiles sont en général nécessaires pour étudier ce phénomène. Diverses protections sont prises, comme, sur les derniers étages basse pression, la réunion par des fils de liaison de groupes de plusieurs ailettes.

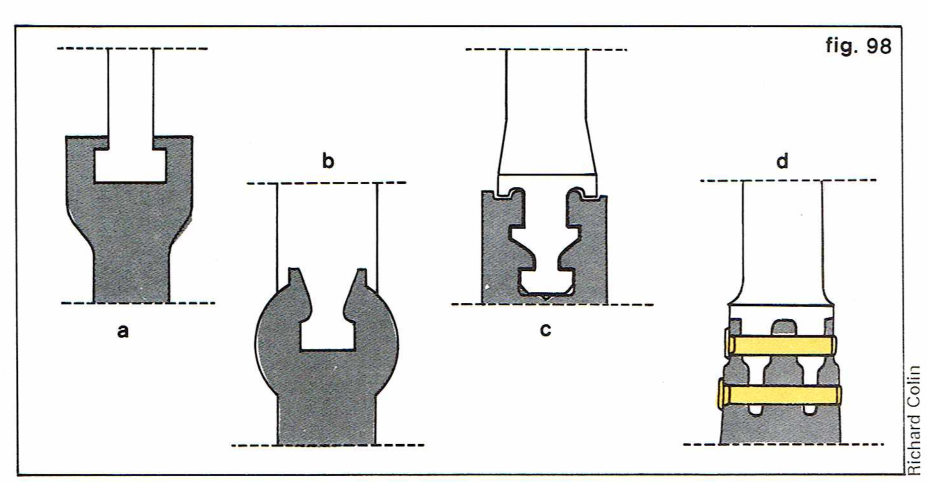
* *Dispositifs d'étanchéité*

Ils ont pour but de limiter les pertes par fuite de vapeur qui se produisent entre les parties fixes et les parties mobiles de la machine, lorsque le jeu qui sépare ces parties met en communication des zones de pression différentes. Il s'agit de fuites internes de vapeur à l'intérieur de la machine et de fuites entre l'intérieur et l'extérieur de la machine aux passages de l'arbre dans le corps de turbine. Cette dernière fuite est une fuite de vapeur lorsque le corps de la turbine est sous pression ; c'est une entrée d'air lorsque le corps est sous vide.

Il n'est pas possible de rendre étanches toutes les lignes de fuites ; tout au plus s'efforce-t-on de limiter le débit de la fuite par des obstacles, qu'on appelle des « labyrinthes ».

Les solutions techniques adoptées varient avec les constructeurs. On trouvera sur la *figure* 99 différents types de réalisation. Les systèmes « effaçables » sont très utilisés, car ils ne sont pas détruits en cas de contact accidentel entre la partie fixe et la partie mobile.

▼ *Figure 98 ; fixation des aubages mobiles : a) queue d'aronde simple ou à tête de marteau (ailette introduite par rotation et blocage par verrou) ; b) emmanchement marteau avec encastrement pour empêcher l'ouverture de la queue d'aronde ; c) queue d'aronde multiple ou montage en sapin ; d) enfourchement et rivetage.*



Domaines d'utilisation

La turbine à vapeur est pour beaucoup d'entre nous la machine géante des centrales électriques. Ce point de vue est justifié, car c'est dans le domaine de la production électrique que la turbine à vapeur s'est imposée par ses possibilités de fournir de grandes puissances. On se reportera au *tableau* X pour voir l'évolution en France de la puissance des groupes turbo-alternateurs. Une évolution sensiblement comparable pourrait être constatée dans les autres pays industrialisés. Elle a pour origine l'abaissement du coût de l'énergie produite entraîné par l' « effet de taille ». Le prix d'une centrale n'est pas proportionnel à sa puissance, ainsi que les coûts de conduite et d'entretien.

Où en sommes-nous aujourd'hui ? Dans le domaine, classique, les turbines à une ligne d'arbre ne dépassent guère 700 à 800 MW. Dans la solution à deux lignes d'arbre *(cross-compound)*, la taille maximale actuelle des groupes est de 1 300 MW. La chaudière classique à cette puissance devient monumentale, et c'est elle qui limitera sans aucun doute la croissance des machines. On peut évidemment, et cela s'est fait, associer deux chaudières pour alimenter une turbine, ce qui permettrait d'augmenter encore la taille des machines. Dans le domaine nucléaire, on sait que les programmes actuels dans le monde font appel à des turbines à une ligne d'arbre, dont la puissance va de 900 à 1 300 MW. A ce dernier niveau de puissance, la machine devient gigantesque, compte tenu de la médiocre qualité de la vapeur nucléaire, et son développement vers des puissances encore supérieures sera probablement vite limité, tout au moins si l'on conserve les conceptions actuelles. Des études sont en cours dans divers pays pour faire sauter les verrous qui ferment la porte à des puissances supérieures. Parmi ceux-ci se trouve l'emploi de la vapeur d'eau comme fluide de travail dont les caractéristiques aux basses pressions du condenseur conduisent à des débits de vapeur qui sont responsables du gigantisme. Son remplacement en fin de cycle par un autre fluide de volume massique beaucoup plus faible paraît être une possibilité intéressante.

Ces remarques sur la taille des grandes turbines productrices d'électricité pourraient faire croire que les petites

Tableau X - Centrales thermiques classiques E.D.F. au 1/6/1977

Équipements	Pression (en bars)	Nombre de tranches	Puissance cumulée (en MW)	Date du programme	Température de la vapeur d'admission (en °C) surchauffé/ resurchauffé	Consommation spéciale (en mth/ kWh)
Moyenne pression	$30 < p < 60$	(11 en réserve)	527		500 max	3 200
Haute pression sans resurchauffe						
palier 40-60 MW	$65 < p < 80$	6 (+ 2 en rés.)	292	1946-1949	510 max	2 900
palier 110 MW	87	5	534	1946-1952	520 max	2 800
Haute pression avec resurchauffe						
palier 60 MW	125	2	110	1956	540/540	3 170
palier 125 MW	87 ou 125	38	4 457	1952-1965	540/540	2 400
palier 250 MW	163	37	9 250	1956-1971	565/565	2 250
palier 600 MW	163	7	4 095	1968-1975	{ 565/565 540/540	2 200
palier 700 MW	163	4	2 740	1972-1973	540/540	2 260
Total thermique classique E.D.F.		99	21 478			

Nota : cette période d'équipement couvre une trentaine d'années. Noter l'augmentation de la puissance unitaire des groupes, de la pression et de la température de surchauffe, avec une stabilisation aujourd'hui à 163 bars, 540 °C. La resurchauffe est apparue dès que la pression a dépassé 87 bars. La consommation spécifique théorique décroît régulièrement avec l'augmentation de la taille des groupes, avec une stabilisation autour de 2 250 mth/kWh.

◀ ***Tableau X : évolution en France de la puissance et des caractéristiques des groupes turbo-alternateurs.***

turbines de puissance faible ou modérée n'ont plus de raison d'exister. Il n'en est rien, et de telles machines sont très utilisées pour des applications industrielles et pour la propulsion navale.

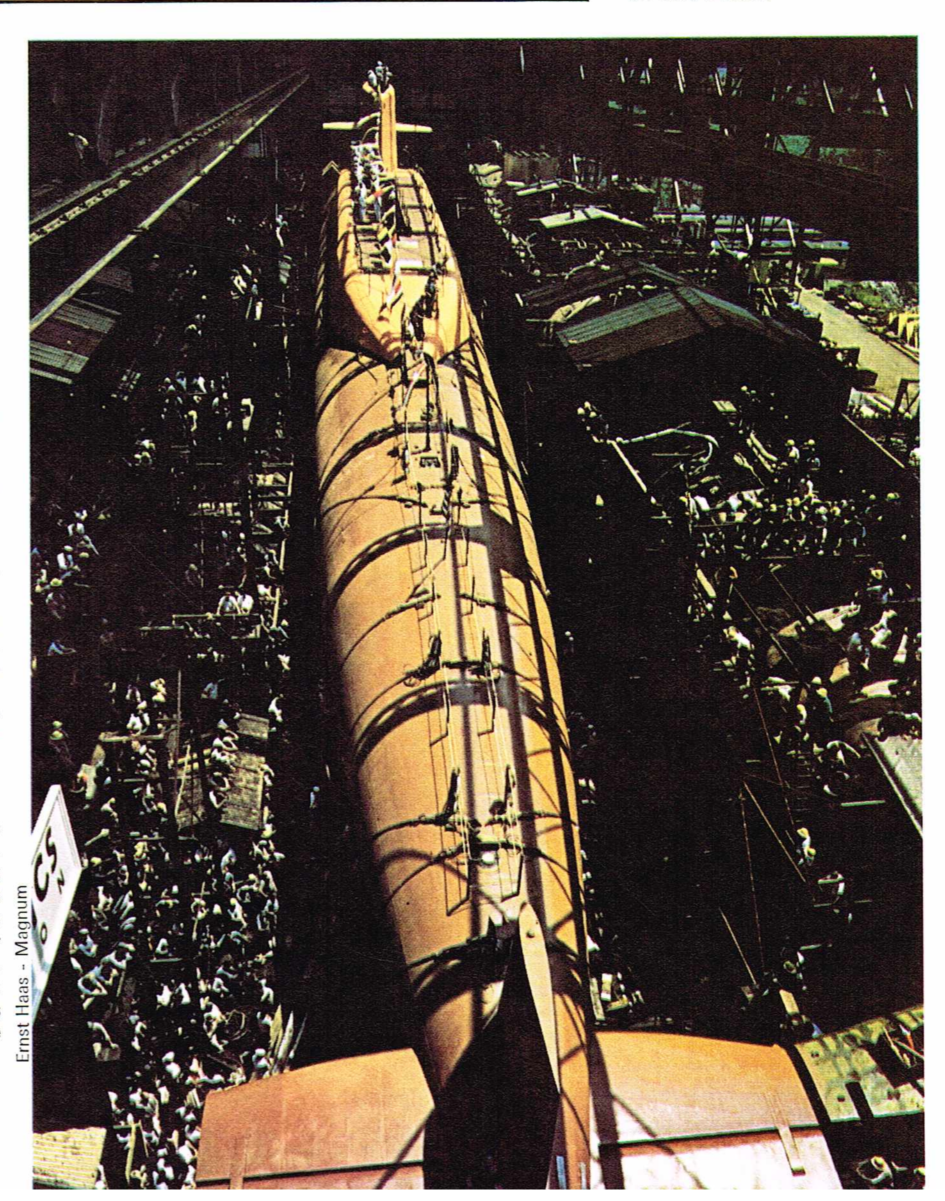
Dans l'industrie, elles sont particulièrement intéressantes lorsqu'il existe un besoin simultané d'énergie électrique et de chaleur. On utilise alors des turbines à prélèvement ou à contre-pression. Elles permettent aussi de brûler des combustibles résiduaires difficilement commercialisables, situation que l'on rencontre dans les mines et les usines métallurgiques. Les turbines utilisées sont de types très divers : leur puissance s'échelonne de quelques centaines de kilowatts à plus de 100 MW.

Pour la propulsion navale, l'utilisation des turbines devient compétitive dès que la puissance nécessaire est significative. Les réalisations vont de quelques mégawatts à plus de 100 MW. Pour des raisons de sécurité et d'encombrement, les fortes puissances sont en général fractionnées en plusieurs groupes qui entrainent chacun une ligne d'arbre. Il est en général nécessaire d'introduire un réducteur entre la turbine et l'arbre porte-hélice, car la vitesse de la première doit être élevée (plusieurs milliers de tours par minute) alors que le second fonctionne à des vitesses très lentes, de l'ordre de la centaine de tours par minute.

Il existe donc une très grande variété de turbines à vapeur, dans une gamme de puissances très large et dans des domaines d'utilisation très divers. L'utilisation de ce type de machine va donc se prolonger encore longtemps. Son développement est loin d'être terminé. La puissance unitaire des machines, malgré leur taille respectable d'aujourd'hui, est sans doute encore appelée à croître.

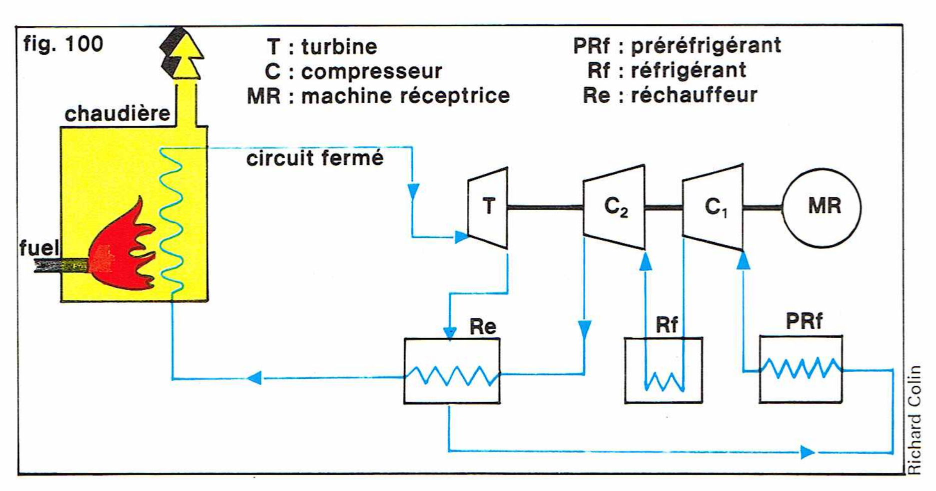
Turbine à gaz en circuit fermé

La disposition générale d'une installation utilisant une turbine à gaz à circuit fermé est donnée sur la *figure* 100. C'est la même masse gazeuse qui décrit le cycle sans aucune communication avec l'atmosphère. Ce gaz échauffé dans la chaudière qui représente la source chaude est détendu dans la turbine. Une partie de sa chaleur résiduelle est récupérée dans un échangeur. Ce gaz, ensuite, est encore refroidi par un réfrigérant avant son entrée dans le compresseur. Ce réfrigérant n'existe pas dans le cycle ouvert, puisque le prélèvement d'air frais se fait directement dans l'atmosphère.



Ernst Haas - Magnum

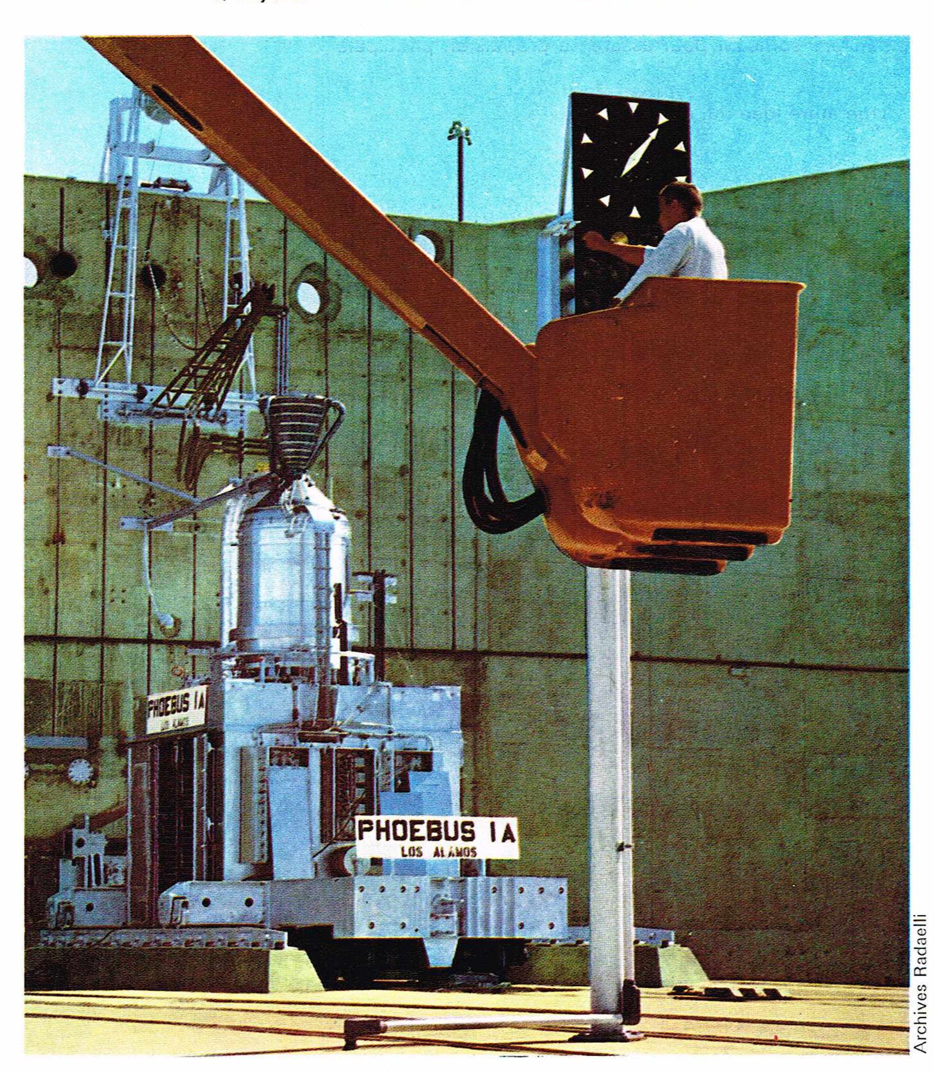
▼ ***Les turbines productrices d'électricité de faible puissance sont très utilisées dans la propulsion navale ; ici, un sous-marin atomique américain en cale sèche.***



▲ *Figure 100 : principe de fonctionnement d'une turbine à gaz en circuit fermé à deux étages de compression et réfrigération intermédiaire.*
▼ *Ci-dessous, le propulseur nucléaire* Phœbus IA, *un des moteurs prototypes expérimentés par les États-Unis. A droite, figure 101 : schéma d'un propulseur nucléo-thermique : 1, réservoir de propergol ; 2, réacteur nucléaire ; 3, tuyère.*

Le cycle théorique ne diffère pas de celui d'une installation fonctionnant en circuit ouvert. Mais la pression d'entrée au compresseur n'est plus obligatoirement celle de l'atmosphère. Il devient possible de relever cette pression, ce qui permet d'augmenter la puissance unitaire des machines.

Le fluide utilisé peut être de l'air ou tout autre gaz. Il est donc possible de le choisir en fonction des exigences de l'installation, ce qui est très intéressant dans le cas des installations nucléaires. Ce fluide de travail reste très propre, ce qui n'est pas le cas lorsqu'on utilise des gaz de combustion. Le découplage entre chaudière et turbine donne la possibilité de brûler toutes sortes de combustibles, et en particulier les combustibles bon marché comme la tourbe et le lignite qui ne sont pas directement utilisables dans un moteur à combustion interne.



Les turbines à gaz en circuit fermé, construites à ce jour pour brûler des combustibles fossiles, utilisent l'air comme fluide de travail. Certaines installations fonctionnent avec un circuit semi-fermé. Le circuit fermé en effet ne résout pas le problème de l'alimentation en air de la chaudière. Dans le circuit semi-fermé, une partie de l'air à la sortie du compresseur HP est dérivée vers la chaudière et une quantité d'air correspondante est prélevée à l'entrée du compresseur BP.

Le circuit fermé, plus complexe que le circuit ouvert, n'est utilisé que dans les applications très spécifiques. Ce type d'installation est appelé à connaître un fort développement si les réacteurs à haute température s'imposent un jour commercialement. Pour ce type de réacteurs, en effet, la solution la plus adaptée pour produire de l'électricité est la turbine à gaz en circuit fermé utilisant un gaz chimiquement et nucléairement neutre, tel que l'hélium.

Moteurs statiques (à propulsion non chimique)

Les moteurs-fusées à propergol chimique examinés avec les moteurs à combustion interne souffrent d'un défaut grave. Pour effectuer une mission dans l'espace, il leur faut emporter une grande quantité, donc une masse importante, de propergol dont la réaction exothermique fournira les gaz chauds nécessaires à la propulsion. De plus, si on se rappelle que le principe de la propulsion dans le vide est d'éjecter vers l'arrière une masse q par unité de temps avec la plus grande vitesse d'éjection possible V_e de façon à obtenir la quantité de mouvement $q \cdot V_e$ maximale qui est à l'origine de la force de réaction, on comprend que lorsqu'on utilise une réaction chimique, la vitesse obtenue va se trouver limitée par l'énergie chimique disponible dans la masse q expulsée.

Les vitesses d'éjection les plus grandes que l'on puisse envisager en utilisant l'énergie libérée pour une réaction chimique sont de l'ordre de 4 000 m/s (cette vitesse est obtenue avec le mélange oxygène-hydrogène qui est un des meilleurs couples de propergols chimiques).

Pour obtenir des vitesses d'éjection supérieures, il faut donc recourir à une source d'énergie autre que l'énergie chimique qui sera par définition extérieure au corps éjecté. Ces moteurs, qui vont fonctionner avec une totale indépendance entre le fluide de travail et la source d'énergie, sont donc bien des moteurs à combustion « externe », compte tenu des réserves déjà formulées sur cette terminologie. Ce sont des moteurs par principe anaérobies (qui n'ont pas besoin de l'air de l'atmosphère pour fonctionner).

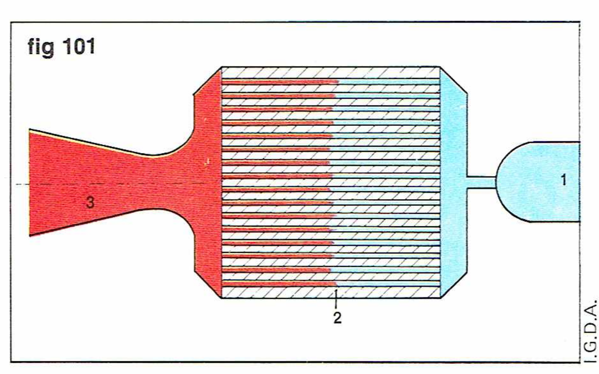
Les chercheurs ont donc essayé d'utiliser en lieu et place de l'énergie chimique les autres formes de l'énergie et, en particulier, l'énergie nucléaire, électrique et rayonnante.

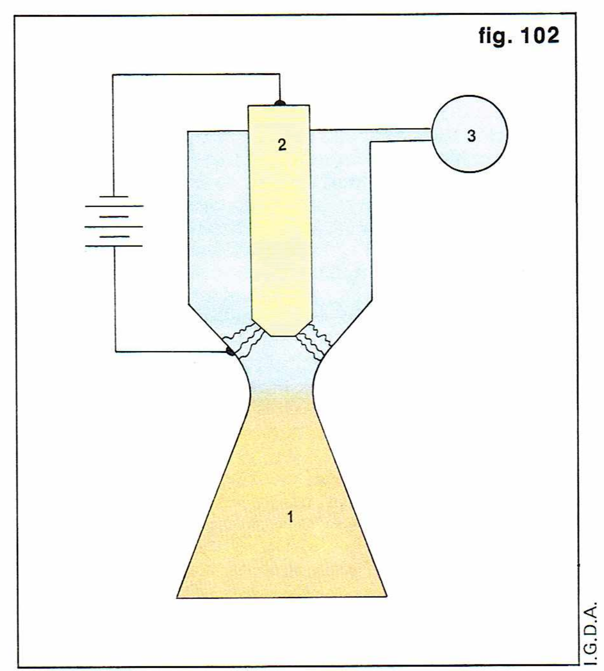
Ces nouveaux propulseurs demandent des moyens de recherche considérables et les programmes lancés aux États-Unis et en U. R. S. S. dans la période 1950-1960 ont beaucoup souffert du ralentissement brutal des programmes spatiaux.

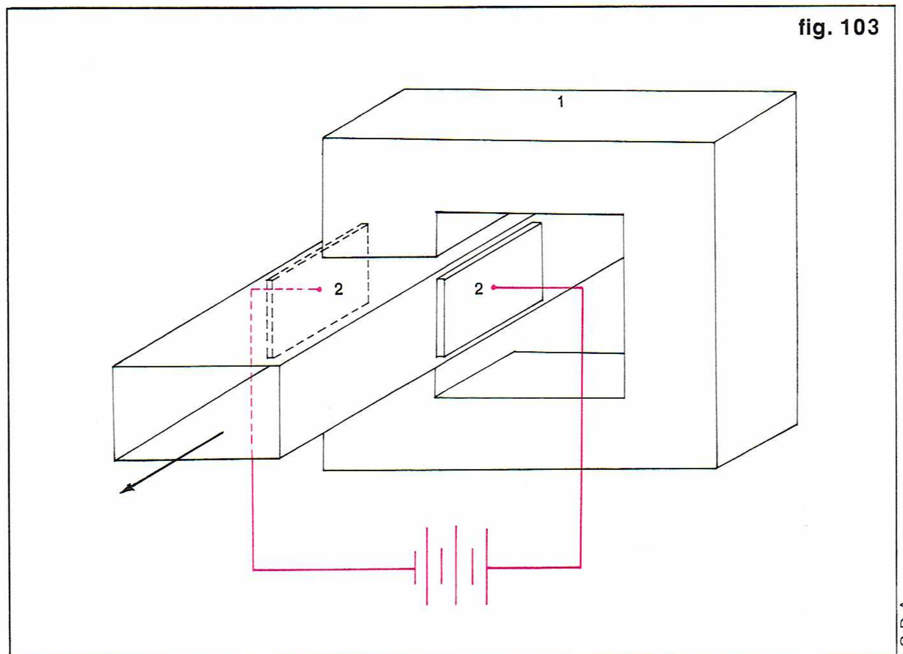
Propulsion nucléaire

Ce propulseur, que l'on appelle aussi *propulseur nucléo-thermique,* est constitué sous sa forme la plus simple d'un réacteur nucléaire solide qui constitue la source chaude, et d'un réservoir de gaz ou de liquide utilisé comme matière éjectable (*fig.* 101).

Si les températures de réchauffage sont faibles (2 500 à 3 000 °K), il faut utiliser des gaz à masse moléculaire







faible et, pratiquement, seuls conviennent l'hydrogène et l'hélium. Si on dispose d'un réacteur permettant des températures nettement supérieures à 3 000 °K, l'utilisation de liquide comme l'eau ou l'ammoniaque constituerait une solution intéressante. Les performances sont fonction de la température de préchauffage. Avec de l'hydrogène par exemple, porté à 4 500 °K, on disposerait d'une vitesse d'éjection de 12 000 m/s environ.

Il s'agit là bien sûr de résultats de calculs théoriques car la mise au point de réacteurs nucléaires susceptibles de travailler à de telles températures reste encore un objectif lointain. Les États-Unis ont lancé, il y a plus de vingt ans, un programme au nom de code de Rover qui a permis de 1958 à 1968 d'expérimenter plusieurs moteurs appelés *Kiwi A, B* et *C*. D'autres prototypes ont ensuite vu le jour : *Nerva, Phœbus*.

Le rapport poussée/poids du moteur est moins bon que celui d'un propulseur chimique du fait de la masse élevée du réacteur. Ce type de moteur s'utiliserait donc pour des missions lointaines sur des véhicules déjà satellisés. Les performances d'un tel moteur sont limitées, comme sur les réacteurs des chaudières nucléaires terrestres, par la température des gaines de combustible. On a imaginé de construire un réacteur utilisant un combustible sous forme gazeuse. Il serait alors possible d'atteindre des températures très élevées. La difficulté principale d'un tel moteur est d'éviter que le combustible gazeux ne s'échappe avec le gaz d'éjection. Ce type de réacteur reste encore, on s'en doute, du domaine de la spéculation théorique.

Propulsion électrique

Nous savons tous qu'il est possible de porter, à l'aide d'un arc électrique, un gaz à une température beaucoup plus élevée que celle des matériaux solides constituant les électrodes. Ce principe conduit donc au *propulseur thermo-électrique* qui peut donner des vitesses d'éjection, après détente dans une tuyère, de 5 000 à 15 000 m/s (*fig.* 102).

Mais il est possible d'accélérer directement les molécules d'un gaz, sans utiliser l'énergie thermique, par passage du gaz, au préalable ionisé, dans un champ électrostatique de plusieurs milliers de volts. Il ne s'agit plus alors d'un moteur thermique puisque l'énergie électrique est transformée, sous forme d'énergie cinétique, directement en énergie mécanique. La vitesse d'éjection de ce moteur, qu'on appelle *propulseur ionique,* pourrait atteindre 100 000 m/s.

Fondé sur le même principe, mais travaillant avec un gaz sous forme de plasma éjecté par une tuyère, après passage dans un champ magnétique intense, le *propulseur à plasma* pourrait disposer de vitesse d'éjection de l'ordre de 10 000 km/s (*fig.* 103).

Propulsion par énergie rayonnante (laser)

La première idée qui vient à l'esprit est d'utiliser l'énergie du Soleil dont on a vu au chapitre sur les ressources énergétiques que le flux dans l'espace, au voisinage de la Terre, était de 0,139 W/cm² (soit 1 MW pour 700 m² environ). Une fusée à énergie solaire aurait l'avantage de fonctionner sans générateur à bord. Malheureusement, le flux solaire, surtout lorsqu'on s'éloigne du Soleil, ne paraît pas suffisant pour assurer la propulsion principale d'une fusée. Tout au plus, et c'est loin d'être négligeable, le flux solaire pourrait servir d'appoint.

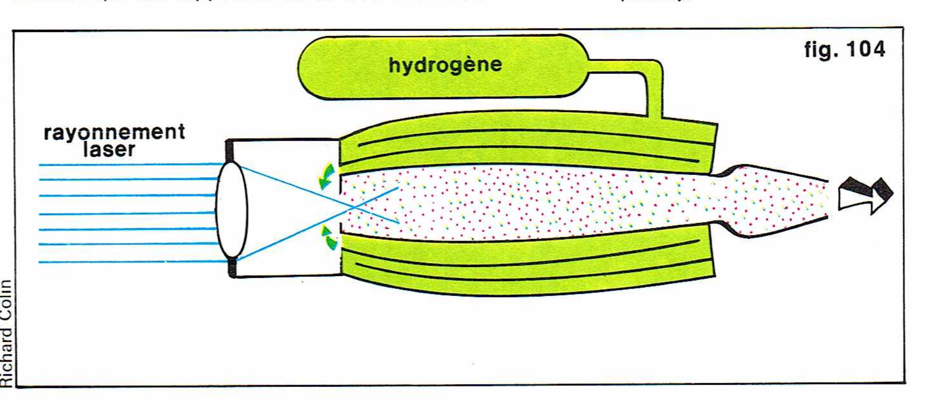
Une autre idée qui est, paraît-il, très prometteuse est la propulsion par laser. L'utilisation des lasers pour le transport d'énergie est bien connue. Dans le cas du propulseur de fusée, le laser serait utilisé pour chauffer le gaz à éjecter après concentration du faisceau lumineux (*figure* 104). Les vitesses d'éjection disponibles se situeraient, suivant le gaz utilisé et la température disponible, entre 10 000 et 15 000 m/s. L'émetteur laser opérerait soit de la Terre, soit à bord d'un satellite. Il reste évidemment à fabriquer des lasers suffisamment puissants pour rendre le procédé intéressant. Il n'en existe pas aujourd'hui mais aucune difficulté théorique ne semble fermer le chemin à ce type de réalisation. Ce procédé ne permettra pas la satellisation rapprochée de grosses charges, opération qui restera longtemps du ressort des propulseurs chimiques, mais il serait, s'il voit le jour, d'une souplesse étonnante pour modifier les orbites des satellites artificiels évoluant autour de la Terre et pour lancer, dans le système solaire, des vaisseaux de grande taille.

Propulsion photonique

Pour clore cette liste des moteurs d'anticipation, signalons l'idée du *propulseur photonique* qui disposerait, par éjection de photons lumineux, de la vitesse de la lumière qui est, rappelons-le, de 300 000 km/s.

▲ ***Figure 102 ; schéma d'un propulseur thermo-électrique : 1, tuyère ; 2, électrode ; 3, réservoir de propergol. Figure 103 ; schéma d'un propulseur à plasma : 1, aimant ; 2, électrodes.***

▼ ***Figure 104 : schéma d'un propulseur par énergie rayonnante (laser).***



Cycles mixtes

Dans ce chapitre consacré à la conversion thermomécanique, nous avons examiné successivement les différents types de moteurs thermiques. Ces moteurs peuvent être utilisés séparément, mais il est aussi possible de les combiner pour profiter de leurs différents mérites respectifs. On arrive alors à des ensembles groupant plusieurs machines de principes souvent fort différents.

Nous avons déjà rencontré des montages de ce type dans les moteurs à explosion ou Diesel. Dès que leur puissance devient significative, il est intéressant de récupérer l'énergie résiduelle des gaz d'échappement dans une turbine à gaz pour entraîner un compresseur de suralimentation du moteur. C'est une solution très répandue. On a aussi mentionné certaines réalisations de propulsion navale où étaient associées une machine à vapeur à piston et une turbine à vapeur. Enfin, il a été fait allusion également au couplage d'un moteur Diesel à piston libre avec une turbine à gaz.

Parmi les exemples historiques, il faut citer la suralimentation des moteurs d'avion par turbocompresseur alimenté par les gaz d'échappement, réalisé en 1916 par Rateau. C'est le premier exemple connu de suralimentation de moteur par turbine. L'idée fut reprise en 1930, mais cette fois-ci pour alimenter des chaudières par des groupes turbocompresseurs (chaudières *Velox* de *Brown-Boveri*).

Les chaudières suralimentées par groupes turbocompresseurs ne se sont pas développées pour des raisons à la fois thermodynamiques (rendement moins bon) et économiques (nécessité de brûler un combustible de qualité). Elles ont été utilisées en propulsion navale en raison de leur plus grande capacité.

▼ Figure 105 : cycle mixte combinant une turbine à gaz et une turbine à vapeur, et consistant à utiliser l'énergie thermique contenue dans les gaz d'échappement de la turbine à gaz pour produire de la vapeur. Figure 106 ; cycle mixte de la centrale E. D. F. de Vitry-sur-Seine, tranches 3 et 4 : turbine à gaz et turbine à vapeur peuvent fonctionner séparément ou être couplées dans un cycle mixte.

fig. 105

GROUPE TURBINE A GAZ

fuel

C

T

air

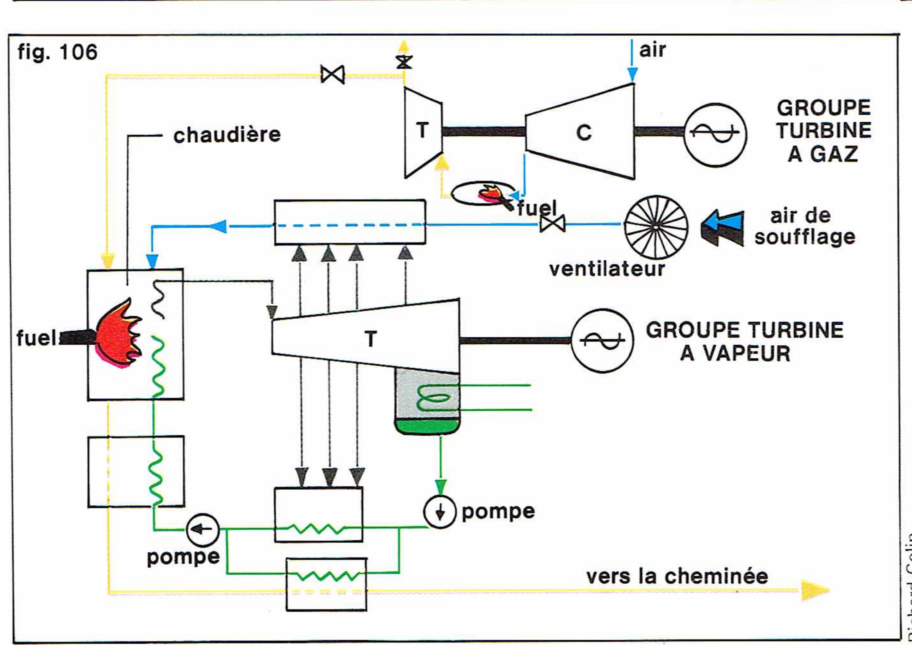
chaudière de récupération

cheminée

GROUPE TURBINE A VAPEUR

T

Richard Colin



Mais l'emploi combiné de turbine à vapeur et de turbine à gaz continue à faire l'objet de réalisations. Deux solutions sont fréquentes pour associer une turbine à gaz avec un ensemble chaudière-turbine à vapeur.

La première solution consiste à utiliser l'énergie thermique contenue dans les gaz d'échappement d'une turbine à gaz pour produire de la vapeur. Cette vapeur est ensuite utilisée pour le chauffage de procédés industriels ou pour la production d'énergie électrique (*fig.* 105).

L'autre solution, qui est beaucoup plus répandue aujourd'hui, consiste à placer la turbine à gaz en amont de la chaudière. La turbine à gaz, dont les gaz de combustion contiennent un large excès d'air (environ 80 %), est utilisée comme un ventilateur de soufflage d'une centrale classique. Cette solution a été récemment utilisée en France sur la centrale Émile Huchet des Charbonnages de France et sur les tranches 3 et 4 de la centrale de Vitry d'E. D. F. (*fig.* 106).

Dans la centrale des Charbonnages, trois turbines à gaz (3 × 16 MW) brûlant du gaz de cokerie sont associées à une chaudière brûlant du charbon de basse qualité. La turbine à vapeur a une puissance de 294 MW. Chaque turbine à gaz peut alimenter le foyer de la chaudière ou peut fonctionner indépendamment. Les gaz sortant de la chaudière traversent les réchauffeurs d'eau et les économiseurs.

Dans la centrale de Vitry, une seule turbine de 42 MW fonctionnant au gaz naturel est associée avec une tranche thermique de 250 MW. Turbine et chaudière peuvent fonctionner ensemble ou séparément. L'exploitation de la tranche s'effectue avec la chaudière seule en dehors des heures de pointe. La turbine à gaz n'est donc utilisée que quelques heures par jour. Pour que le rendement de l'installation soit conservé, quand la turbine à gaz n'est pas en service, l'installation fonctionne suivant un cycle un peu particulier dans lequel le réchauffage de l'air, comme celui de l'eau habituellement, se fait par soutirage de vapeur *(cycle Cesas)*.

Ces cycles mixtes permettent d'augmenter la puissance d'une tranche classique en payant à un faible prix la puissance complémentaire, et de disposer d'une rendement légèrement supérieur.

En conclusion, la combinaison d'une turbine à gaz avec une centrale à vapeur apparaît comme une solution intéressante, tant pour son coût d'investissement que pour sa souplesse de fonctionnement. Ce type d'installation se développera très certainement avec le progrès technique des turbines à gaz, d'autant plus qu'on cherchera à assurer la production de l'énergie de pointe par des installations brûlant des combustibles fossiles, la base étant produite par les centrales hydrauliques ou nucléaires.

Conversion électromécanique

Deux phénomènes vont se conjuguer, dans un proche avenir, pour augmenter la consommation d'énergie sous sa forme électrique. Ce sont, d'une part, la poursuite de l'augmentation de la consommation globale d'énergie et, d'autre part, au sein de cette croissance, le rôle grandissant de l'électricité comme source d'énergie primaire.

L'augmentation du niveau de vie et, par voie de conséquence, la croissance de la consommation d'énergie paraissent être en effet un mouvement inéluctable. Qui ne le souhaiterait pour les nombreux pays en voie de développement ? Pour les pays industrialisés, le taux de croissance devrait être moins fort, compte tenu des niveaux déjà atteints, mais il ne faut pas compter sur un renversement de tendance, tant il est vrai qu'une société ne peut pas, sauf sous la contrainte, retourner à une étape antérieure de son développement !

Mais pourquoi l'électricité devrait-elle participer davantage à cette croissance ? A la production, les futures sources d'énergie destinées à suppléer les combustibles fossiles : nucléaire (fission ou fusion) et énergies nouvelles, sont basées pour la plupart sur une conversion conduisant à la production d'électricité. Leur mise en œuvre va donc augmenter la part de cette forme d'énergie à la production. A l'autre bout de la chaîne, les qualités de l'électricité : propreté, distribution facile, transformation et conversion dans les autres formes d'énergie possibles, en font un support d'énergie tout à fait remarquable. Tout nous conduit donc à penser que nous allons vers un monde de plus en plus « électrique ».

Si on considère à présent la conversion électromécanique, il faut remarquer que ce type de conversion se fait dans les deux sens et, presque toujours, avec un bon rendement. Ce sont souvent les mêmes machines qui assurent les deux sens de la conversion. Tout le monde sait que sur certaines lignes ferroviaires de régions montagneuses, les machines des motrices fonctionnent en « moteur » à la montée des rampes et en « générateur » pour faire du freinage à la descente. Dans ce dernier cas, la motrice renvoie de l'énergie électrique sur le réseau.

Si une machine électrique peut théoriquement fonctionner aussi bien en moteur qu'en générateur, dans la pratique les machines sont spécialisées, si on excepte quelques cas particuliers comme celui mentionné ci-dessus. Une machine est donc faite pour fonctionner dans un certain sens de la conversion, et ce n'est que dans des conditions anormales que l'inversion de la conversion, toujours possible, se produit. Les générateurs et les moteurs vont donc se distinguer, non par des différences dans leur théorie ou leur technologie, mais par les conditions mêmes de leur fonction.

Les exigences entre les impératifs de la production d'une part et les besoins de la consommation, d'autre part, ont amorcé très vite dans l'histoire de l'électricité un double mouvement concernant la taille des machines.

D'un côté, pour des raisons économiques, les générateurs ont vu leur taille augmenter de façon régulière. Si l'on excepte les génératrices affectées à des tâches spécifiques et qui ne représentent en production qu'un très faible pourcentage, on peut dire que dans les pays industrialisés, une grande part de l'électricité est produite par un petit nombre d'alternateurs de très forte puissance unitaire dont le maximum est aujourd'hui 1 300 MW, demain 1 500 MW ou plus. Cette tendance ne semble pas devoir s'inverser dans un futur proche ; tout au plus verra-t-on une stabilisation de la taille des machines.

De l'autre côté, en face des quelques alternateurs géants qui seront mis en service chaque année, se présente le monde foisonnant et insolite des moteurs électriques. Dans une gamme de puissances allant de zéro à quelques mégawatts, dotés également d'une large gamme de vitesses, les moteurs électriques sont aujourd'hui partout. Leur vitesse peut être fixe, ajustable ou variable. Ils sont, de plus, interchangeables, étant normalisés en dimensions, types et vitesses. Les plus petits ont envahi notre univers familier et si nous ne les remarquons guère, c'est que la plupart du temps ils fonctionnent sans anicroche.

Ces moteurs qui travaillent à notre place sont donc, suivant une formule souvent employée, des « esclaves mécaniques » à notre disposition. Lorsqu'on nous dit que l'homme d'aujourd'hui dispose de plusieurs dizaines d'esclaves mécaniques, sachons que la plupart d'entre eux sont des moteurs électriques. Ces esclaves ne sont pas des robots anthropomorphes un peu rétifs tels que les futurologues du XIXe siècle les imaginaient. Ce sont des machines dociles aux performances élevées, au fonctionnement sûr, dont la petite taille leur permet de s'intégrer aux appareils qu'ils animent. Ils savent souvent se rendre irremplaçables : qui accepterait aujourd'hui d'utiliser de façon habituelle un phonographe ?

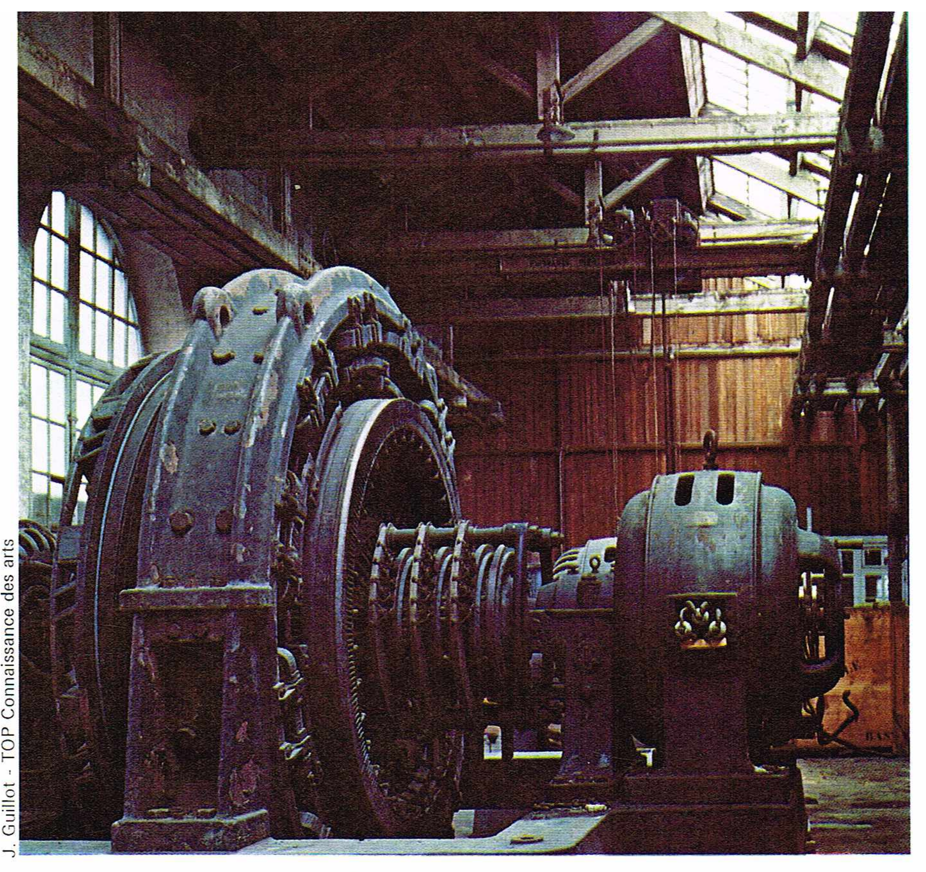
Les moteurs électriques vont donc retenir toute notre attention et, délaissant les générateurs qui font partie du secteur très spécialisé de la production d'énergie électrique, et que peu d'entre nous ont l'occasion d'approcher, nous allons consacrer aux moteurs qui nous entourent ce chapitre sur la conversion électromécanique.

Présentation générale des moteurs électriques

On ne reviendra pas ici sur la théorie du fonctionnement des moteurs électriques. Le lecteur pourra se reporter pour cela au texte *Électrotechnique* du volume II de *Physique*. Nous rappellerons seulement qu'on utilise dans les machines électriques l'action d'une induction magnétique sur un conducteur traversé par un courant. Ce phénomène a deux aspects.

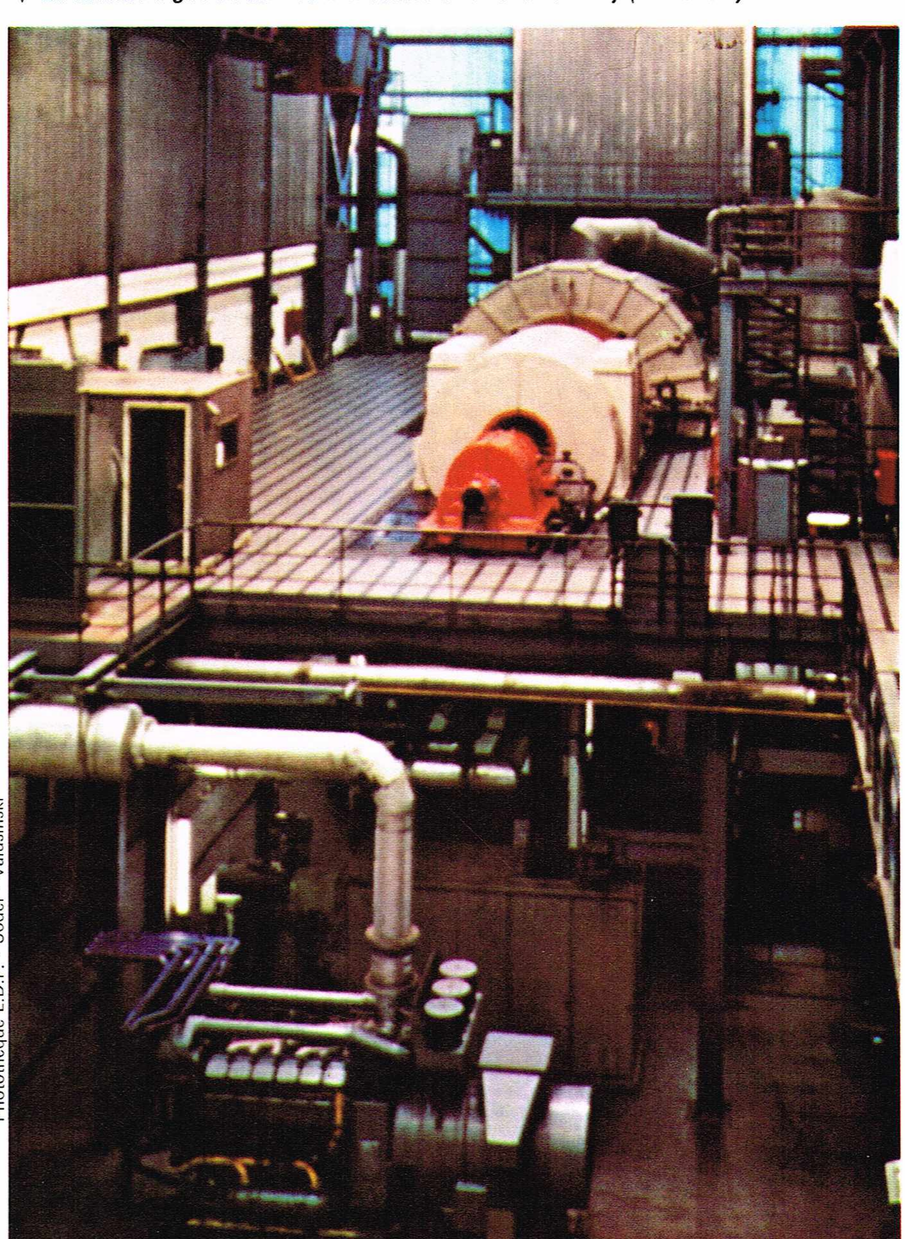
Loi de Laplace

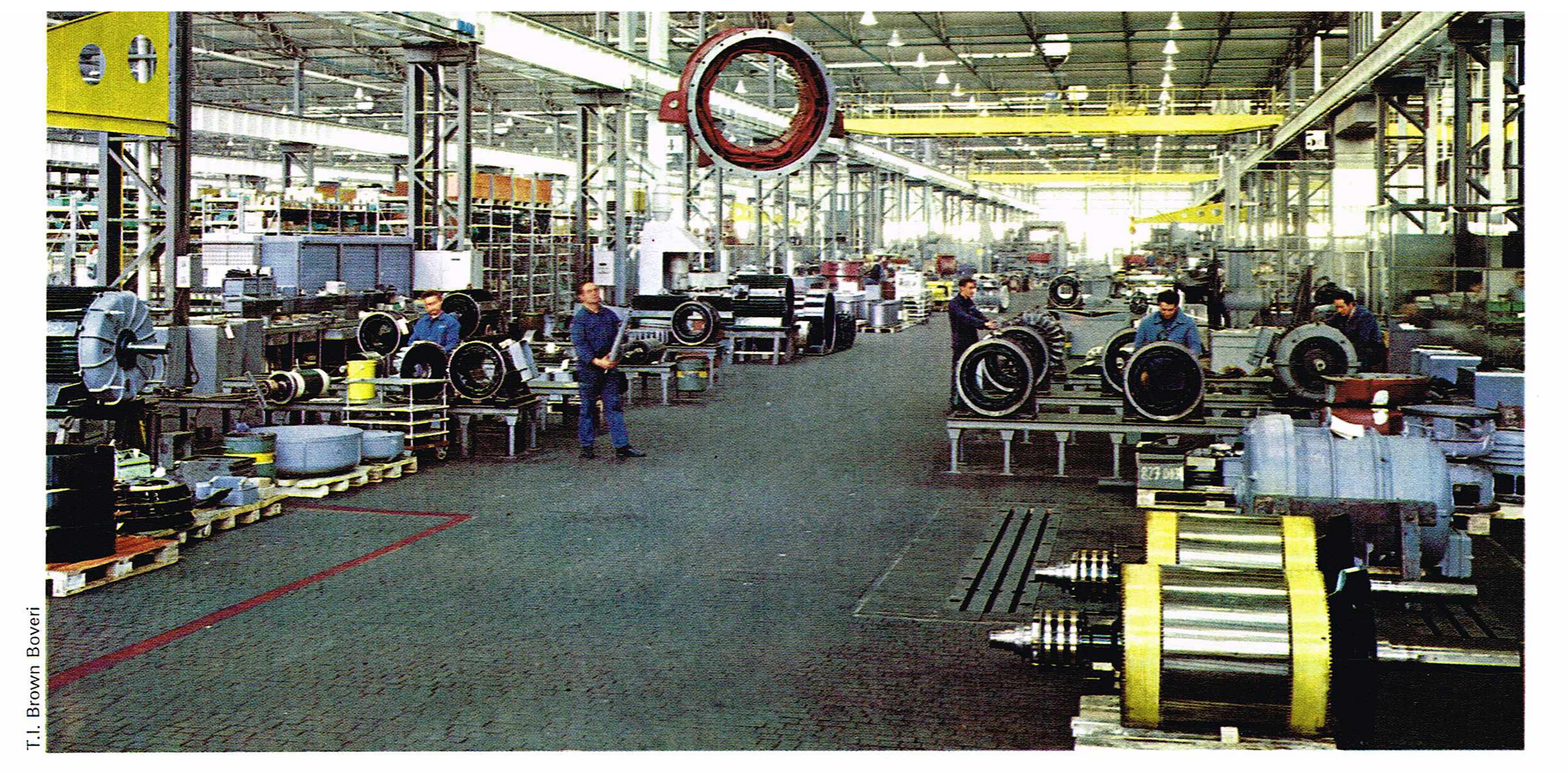
Un conducteur parcouru par un courant et placé dans un champ d'induction magnétique est soumis à des forces.


J. Guillot - TOP Connaissance des arts

▲ ***Alternateur construit en 1825, exposé dans le hall de montage des usines de Creusot-Loire dont un projet à l'étude prévoit de le transformer en un musée de la sidérurgie du Creusot.***

▼ ***La turbine à gaz en service à la centrale E. D. F. de Vitry (tranche 4).***

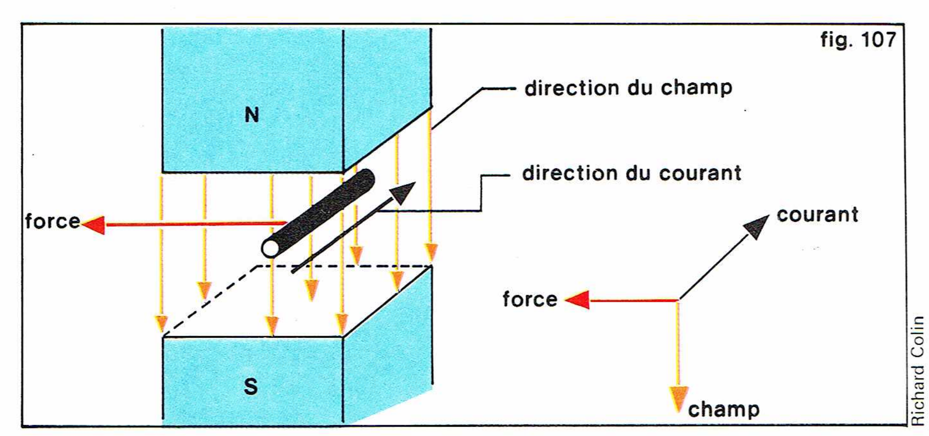

Photothèque E.D.F. - Sodel - Valusinski



T.I. Brown Boveri

▲ *Usine de fabrication de moteurs électriques. La production et l'utilisation de l'énergie électrique sont deux des facteurs principaux de l'évolution industrielle du XXᵉ siècle et expliquent comment ces machines dociles et aux performances élevées ont su se rendre irremplaçables.*

▼ *Figure 107 : positions relatives du champ, du courant et de la force illustrant la loi de Laplace.*



Richard Colin

Loi de Faraday

Une force électromotrice est induite dans un circuit électrique par la variation avec le temps du flux du champ magnétique qui le traverse. Ce flux peut varier, soit par déplacement du circuit électrique, soit par modification du champ lui-même.

Ces deux lois indiquent bien comment se fait la conversion d'énergie électrique en énergie mécanique et inversement. Un courant (énergie électrique) peut produire un déplacement (énergie mécanique) et *vice versa.*

La *figure* 107 illustre la loi de Laplace qui nous intéresse plus particulièrement, puisque c'est celle qui décrit la conversion électromécanique effectuée par les moteurs électriques. L'expression de la force exprimée en newtons est rappelée ci-dessous :

$$f = ilB$$

où i est le courant en ampères, B le champ d'induction magnétique en webers/m², et l la longueur en mètres. L'illustration montre les directions relatives du courant, du champ et de la force. Cette dernière change de sens si on inverse le sens du champ ou du courant. Sa direction reste inchangée si on inverse champ et courant à la fois.

Rappelons également que la puissance mécanique fournie par ce moteur élémentaire est égale au produit du courant i par la variation du flux $d\psi$ vue par l'élément du circuit :

$$P = i\frac{d\psi}{dt}$$

$\frac{d\psi}{dt}$ est aussi l'expression, au signe près, de la force électromotrice qui serait induite dans le circuit selon la loi de Faraday :

$$\varepsilon = -\frac{d\psi}{dt}$$

$\varepsilon' = \frac{d\psi}{dt}$ est appelé force électromotrice et on a :

$$P = \varepsilon' i$$

Ce produit $\varepsilon' i$ représente la puissance électrique convertie et restituée par le moteur, aux pertes près, en puissance mécanique : $P_m = \varepsilon' i$ — pertes

Notons enfin que la tension aux bornes d'un moteur est égale à la somme de la force contre-électromotrice et de la chute ohmique entraînée par le passage du courant.

$$V = \varepsilon' + Ri$$

Description sommaire d'un moteur électrique

Un moteur utilisant les principes de la conversion électromécanique peut se présenter sous la forme d'une machine tournante ou d'une machine linéaire (*fig.* 108).

Les machines tournantes, qui sont de loin les plus répandues, comportent deux armatures cylindriques coaxiales, mobiles l'une par rapport à l'autre. Considérées d'un point de vue électrique, ces deux armatures, qui comportent des circuits ou enroulements, sont appelées :

— *inducteur*, lorsqu'elles créent le champ magnétique ;
— *induit*, lorsqu'elles sont le siège de forces contre-électromotrices induites par ce champ.

Si l'on se place, à présent, sur un plan mécanique, on peut distinguer :

— le *stator* qui est fixe ;
— le *rotor* qui est mobile, porté par des paliers.

Le bon fonctionnement électrique exige que les deux parties du moteur possèdent des circuits magnétiques avec lesquels les circuits électriques vont se trouver en interaction. Il est donc fait appel à des matériaux ferromagnétiques et, pour cette raison, le jeu entre rotor et stator, nécessaire au bon fonctionnement mécanique de la machine, s'appelle *entrefer.* Chacune de ces deux parties mécaniques peut jouer le rôle d'inducteur ou d'induit selon la machine considérée. Sur les moteurs, le stator joue généralement le rôle d'inducteur et le rotor le rôle d'induit.

Le moteur linéaire comprend de la même façon un inducteur et un induit. Les termes de stator et rotor des machines tournantes ne conviennent plus ici et ne devraient pas être utilisés.

L'alimentation des moteurs peut se faire de différentes façons. Comme on vient de voir qu'un moteur a deux parties, l'alimentation peut être :

— simple : elle intéresse alors le stator ;
— double : elle intéresse le stator et le rotor.

L'alimentation du rotor, partie mobile de la machine, peut se faire de deux façons :

— par bague,
— par collecteur.

Classification des moteurs électriques

On peut classer les moteurs électriques de multiples façons et en particulier suivant les critères suivants.

Puissance

La valeur d'un cheval-vapeur (736 W) sépare ainsi les gros moteurs des petits moteurs. Pour ces derniers,

on parle aussi de moteurs fractionnaires (fraction de cheval), suivant en ceci l'habitude anglo-saxonne. Ces moteurs sont de loin les plus nombreux. Ils sont fabriqués en très grandes quantités (plus de 25 millions d'unités en 1974) par des procédés fortement automatisés.

Fonction

Dans ce cas, on donne au moteur des appellations qui indiquent la destination ou les conditions d'utilisation du moteur : c'est ainsi que l'on parle de moteur-couple, de moteur-frein, de servomoteur, etc.

Configuration électrique

Les moteurs sont ici classés en fonction de critères électriques. On trouvera la classification la plus usuelle sur la *figure* 109. Différents critères sont utilisés : disposition des enroulements (moteurs à courant continu), type de construction du rotor pour les moteurs à induction, ou astuce de démarrage.

Protection mécanique et réfrigération

On peut parler ainsi de construction étanche, à ventilation extérieure, semi-ouverte, ouverte, etc., ou de réfrigération par air, par eau, etc.

Possibilité de variation de la vitesse

C'est un critère qui intéresse l'utilisateur. La vitesse des moteurs peut être constante, variable ou réglable. Un moteur peut avoir aussi plusieurs vitesses.

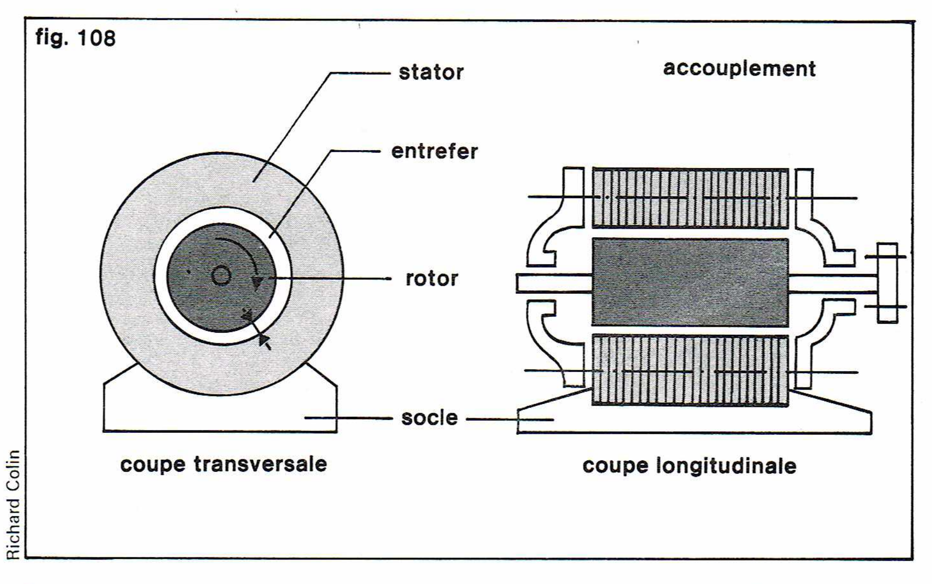
Conditions de montage

On considère ici la façon dont est fixé le moteur sur ses éléments de supportage : position verticale ou horizontale, attache par pattes, par brides, etc.

Ces différentes façons de classer les moteurs électriques font apparaître la grande variété possible de ces appareils puisqu'il existe de toute évidence un très grand nombre de façons de combiner ces critères entre eux. En pratique, pour des raisons économiques, les moteurs sont normalisés, ce qui évite la multiplication anarchique des types de ces appareils.

Caractéristiques

Choisir un moteur pour une application donnée, c'est trouver le moteur qui satisfait sans exagération à toutes les exigences cinématiques (vitesse et accélération) du récepteur, sans que pour autant ce moteur dépasse ses limites admissibles de couple et de température.



Richard Colin

▲ *Figure 108 : schéma de principe d'un moteur électrique rotatif.*

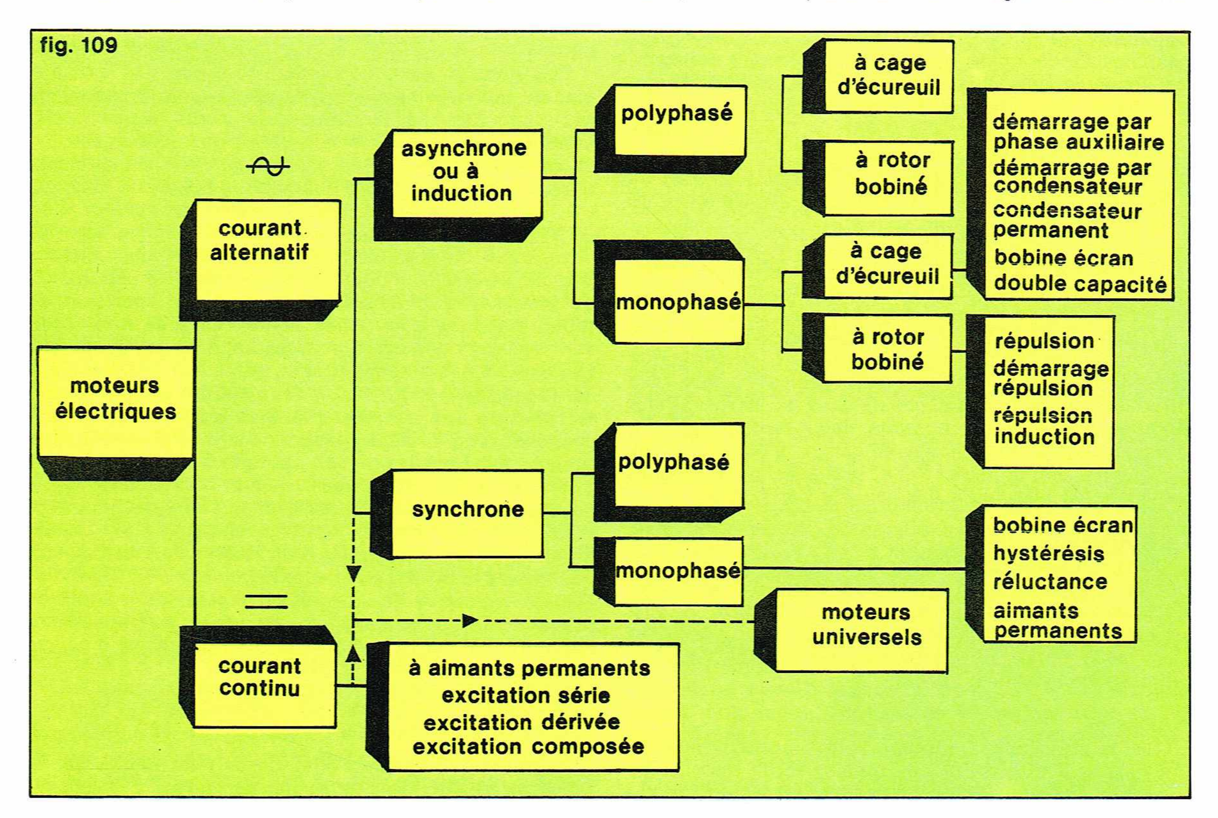
Couple

Deux valeurs sont à considérer : le couple de démarrage et le couple à la marche nominale. Durant la phase de démarrage, le couple « moteur » doit toujours rester supérieur au couple résistant du récepteur, sinon le démarrage ne peut pas s'effectuer. L'accélération de l'ensemble moteur-récepteur est d'autant plus grande que la différence entre couple de démarrage et couple résistant est importante.

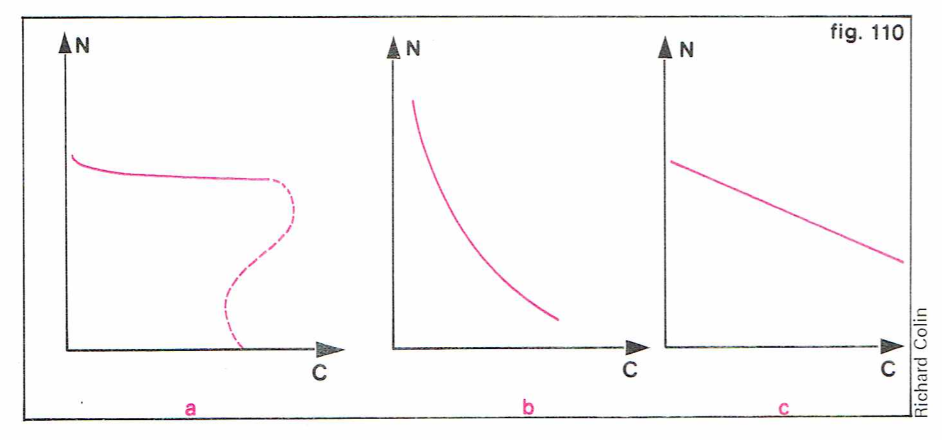
On conçoit que la variation du couple en regard de la vitesse revêt une grande importance. La relation entre ces deux grandeurs apparaît immédiatement sur un diagramme (N, C) comme ceux représentés sur la *figure* 110. Les électriciens ont l'habitude d'utiliser comme références pour décrire une courbe caractéristique (N, C) celles des moteurs à courant continu. C'est ainsi que l'on parle des courbes suivantes.

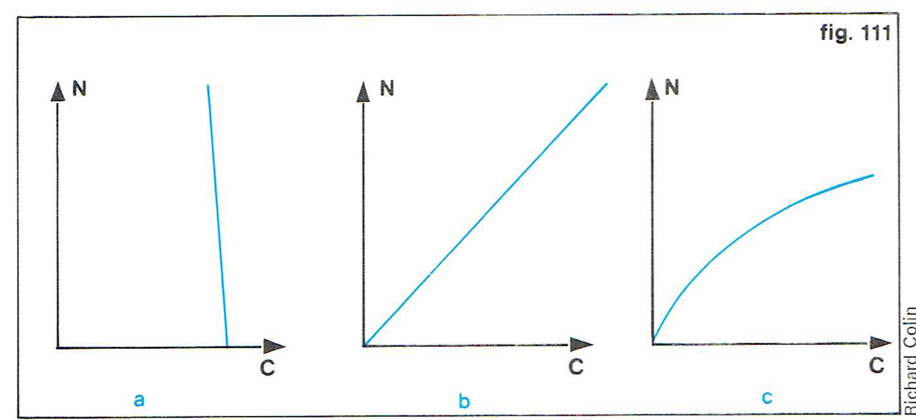
— *Type « dérivation » (ou shunt).* La variation de vitesse en fonction de la charge est faible. Ce type de caractéristique convient bien si l'on souhaite une vitesse constante alors que la charge varie.

— *Type « série ».* Le couple est très élevé à vitesse nulle ; il décroît quand la vitesse augmente. Le moteur



◀ *Figure 109 : classification des différents moteurs électriques.*





▲ *Figure 110 ; différents types de courbes caractéristiques* (N, C) *de moteurs électriques :*
a) *type dérivation (shunt) ;*
b) *type série ;*
c) *type composé ou compound.*
Figure 111 ; différents types de courbes caractéristiques (N, C) *de machines réceptrices :*
a) C *constant ;*
b) C *proportionnel à* N ;
c) C *proportionnel à* N^2.

peut s'emballer à charge nulle. Ce type de caractéristique convient bien aux applications du type « traction » : besoin d'un fort couple au démarrage, charge croissante avec la vitesse.

— *Type « composé » (ou compound).* Cette caractéristique diffère du type shunt par une plus grande variation de la vitesse avec le couple.

De la même façon, on peut caractériser les courbes (N, C) des machines réceptrices (voir *figure* 111). Les relations les plus habituelles sont les suivantes.

— *Couple constant.* Dans ce cas, la puissance est proportionnelle à la vitesse. Il existe de nombreuses machines fonctionnant à couple sensiblement constant. Les appareils élévateurs (palans, treuils, monte-charge, ascenseurs, etc.) en sont de bons exemples.

— *Couple proportionnel à la vitesse.* Ce cas, le moins fréquent, se rencontre par exemple sur les machines à cylindres chauffants destinées à lustrer ou à sécher les étoffes et les papiers (calandres). La puissance croît alors comme le carré de la vitesse.

— *Couple proportionnel au carré de la vitesse.* Cette relation se rencontre sur la plupart des turbomachines : pompes centrifuges par exemple. La puissance est alors proportionnelle au cube de la vitesse.

Il faut noter qu'il s'agit ici de courbes types représentant des caractéristiques de machines, aussi bien motrices que réceptrices, fonctionnant sans autre régulation que celle introduite par les phénomènes naturels qui régissent leur fonctionnement. Il est possible, bien évidemment, de fabriquer toutes autres sortes de caractéristiques par des régulations appropriées. Cette pratique, généralement coûteuse, est réservée à des cas très particuliers.

Accélération

Elle conditionne directement le temps de démarrage du moteur. Ce temps est d'autant plus grand que le couple d'accélération (couple moteur moins couple récepteur) est petit et que l'inertie du rotor est grande. L'obtention d'un faible temps de démarrage est primordiale dans certaines applications.

Puissance

C'est la puissance que fournit le moteur pour entraîner son récepteur aux conditions nominales de marche. La puissance, le couple et la vitesse sont liés par la relation :

$$P = C \times N$$

La marche du moteur est supposée régulière et continue sur de longues périodes de temps. Ce n'est pas toujours le cas et le cycle de travail d'une machine peut être très irrégulier. Dans ce cas, la présence d'un volant sur l'arbre moteur permet d'absorber les pics de la charge, le moteur se contentant, entre les intervalles de travail, de restaurer l'énergie perdue du volant. Le cycle de travail peut, dans certains cas, imposer au moteur de fréquents démarrages. L'énergie nécessaire pour démarrer étant en général très supérieure à celle de la marche normale pour une même période de temps, de fréquentes opérations de démarrage vont donc entraîner des températures anormales dans ce cas, et ces conditions particulières de marche sont donc devenues le critère principal de dimensionnement du moteur.

Facteur de charge

Le facteur de charge est un pourcentage qui indique la marge de fonctionnement du moteur au-dessus de sa puissance nominale, marge dans laquelle il peut fonctionner sans échauffement dangereux. Le facteur de charge peut autoriser un fonctionnement de durée indéfinie en surcharge, et il ne traduit alors que le surdimensionnement du moteur ; il peut être assorti d'une durée limitée de fonctionnement. Il faut toujours garder à l'esprit que la puissance d'un moteur n'est limitée que par la température de ses enroulements.

Un moteur calculé avec un facteur de charge peut donc :

— fonctionner avec une marge de sécurité en marche normale ;

— être surchargé occasionnellement ;

— accommoder une erreur dans la définition de sa puissance nominale ;

— permettre une augmentation de puissance ultérieure lors d'une modification de l'installation.

On voit donc que le choix de la puissance d'un moteur électrique se présente comme un compromis entre le coût de la machine et ses performances, et exige une analyse détaillée des conditions de fonctionnement du moteur.

Matériaux

On a vu qu'une machine électrique se composait de deux types de circuit :

— le circuit inducteur qui produit le champ magnétique (ce circuit n'existe pas sur les petits moteurs utilisant un aimant permanent) ;

— le circuit induit qui subit l'action du champ magnétique.

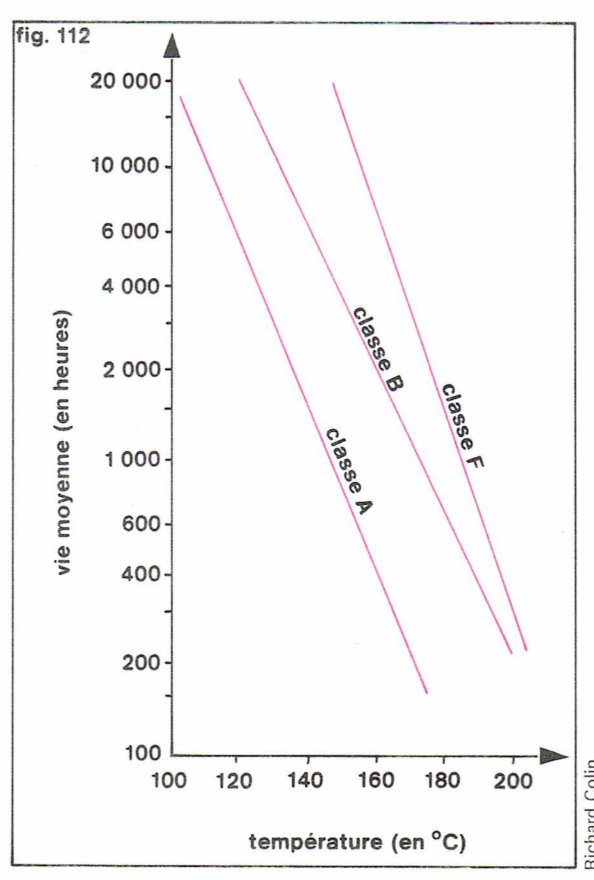
Ces circuits sont constitués soit par des bobines placées sur des pôles, soit par des barres logées dans des encoches. Ils constituent la partie sensible des moteurs. Pour les réaliser, on utilise des conducteurs en cuivre (éventuellement en aluminium). Ces conducteurs dont la section est limitée pour réduire l'effet des courants de Foucault parasites, sont toujours recouverts d'un isolant. Pour des petits conducteurs, comme les fils, l'isolement est produit par une ou plusieurs couches d'émail. Pour les conducteurs de section plus importante, on ajoute à la protection de l'émail une épaisseur de ruban imprégné d'un vernis isolant. La soie et le coton sont utilisés à cet usage pour les applications courantes. Les enroulements terminés sont, après leur mise en place sur la machine, enduits d'un compound destiné à assurer la cohésion des bobinages et à en parfaire l'isolement.

La vie d'un moteur fonctionnant à une température donnée est fonction de son aptitude à résister à l'humidité, à la tension et au vieillissement des isolants.

La principale cause de destruction d'une machine reste l'altération des isolants par la chaleur. L'expérience montre que le temps de vie d'un isolant est une fonction exponentielle de la température. La norme UTE C-51-100 (Union technique de l'électricité) classe les isolants en fonction de la température maximale qu'ils peuvent supporter pendant plusieurs dizaines de milliers d'heures sans altération de leur pouvoir isolant :

Classe :	Y	A	E	B	F	H	C
θ °C max. :	90	105	120	130	155	180	180

La *figure* 112 illustre l'effet de la température sur la durée de vie des isolants pour trois classes d'isolement.



◀ *Figure 112 : vie moyenne d'un isolant en fonction de la température.*

On peut noter qu'en moyenne une réduction de la température de 10 °C se traduit par un doublement de la durée de vie.

Si un moteur est choisi conformément aux normes actuelles, sa durée de vie est approximativement de 35 000 h dans des conditions normales de fonctionnement. Pour une machine travaillant souvent à charge partielle ou de façon discontinue la durée de vie pratique est d'environ 20 ans.

Il existe de nombreux matériaux pouvant être utilisés pour l'isolement des bobinages. Les moteurs de classe C utilisent principalement les tissus en fibre de verre imprégnés de silicone.

Moteurs à courant alternatif

Les moteurs à courant alternatif peuvent être divisés en deux grandes familles : les moteurs asynchrones ou moteurs à induction et les moteurs synchrones.

Le moteur à induction est de loin le plus répandu des moteurs à courant alternatif. Ce n'est en fait qu'un transformateur dont l'enroulement primaire serait fixe et l'enroulement secondaire tournant. L'enroulement primaire porté par le stator est alimenté par le réseau ; dans le secondaire constitué par le rotor, circulent des courants induits. Ces courants placés dans le flux généré par les enroulements du stator créent le couple moteur. Une seule partie du moteur, le stator, est donc reliée au réseau, l'autre fonctionnant avec des courants induits. C'est de cette constatation que ce type de moteur tire son nom de moteur à induction.

Le moteur synchrone constitue une autre famille de moteurs qui diffèrent notablement des premiers par leur constitution et leurs caractéristiques. La vitesse de ces moteurs est constante par définition puisqu'elle est inhérente à la pulsation du courant alternatif qui l'alimente. C'est pour cette raison que ces moteurs sont appelés « synchrones ».

Moteurs à induction ou asynchrones

Ces moteurs sont donc constitués par une partie fixe (stator) qui porte dans des encoches de son circuit magnétique un enroulement (polyphasé ou monophasé), et une partie mobile (rotor) dont les enroulements sont fermés sur eux-mêmes lors du fonctionnement. De tels moteurs fonctionnent nécessairement à une vitesse inférieure à celle du synchronisme et sont appelés pour cette raison « asynchrones ».

Ce moteur utilise l'action d'un champ tournant sur les courants qu'il induit dans une masse métallique. Ce principe est illustré *figure* 113 par un aimant permanent et un disque métallique alignés suivant un même axe AA'.

Par sa rotation, l'aimant crée un champ tournant qui induit dans le disque des courants de Foucault. Les forces dues à l'action du champ sur les courants induits s'opposent à la cause qui leur donne naissance (loi de Lenz) c'est-à-dire au mouvement du champ par rapport au disque ce qui entraîne ce dernier en rotation dans le sens du champ.

Les vitesses du champ et du disque doivent être différentes pour qu'il y ait couple ce qui donne au moteur son qualificatif d'asynchrone.

Sur un moteur, le champ tournant est réalisé électriquement par des enroulements statiques.

Les moteurs à induction sont les plus couramment utilisés en raison de leurs nombreuses qualités : construction simple et économique, rendement satisfaisant, et vitesse sensiblement constante quel que soit le couple. Les moteurs à alimentation triphasée se font à toutes les puissances et sont presque systématiquement utilisés dès lors qu'une telle alimentation est disponible. Les moteurs monophasés sont en général des moteurs de faible puissance (quelques watts à quelque 100 watts). Leur puissance peut aller néanmoins jusqu'à 20 kW.

Moteurs à induction polyphasés

Ces moteurs sont de deux types qui se distinguent par la construction du rotor : rotor à cage d'écureuil ou rotor bobiné. Le stator est identique dans les deux types de moteurs ainsi que dans le moteur synchrone. L'alimentation du stator peut se faire en courant di- ou triphasé.

On ne reviendra pas ici sur le fonctionnement de ce type de moteur qui a été longuement décrit dans le texte *Électrotechnique*. On rappellera seulement que le fonctionnement d'une machine asynchrone est caractérisé par son glissement :

$$g = \frac{N_s - N}{N_s}$$

avec N_s, vitesse du champ tournant en t/mn

$$N_s = \frac{60\,f}{p}$$

f = fréquence du réseau, p = nombre de paires de pôles et N = vitesse en t/mn du rotor.

La vitesse du moteur peut donc s'exprimer ainsi :

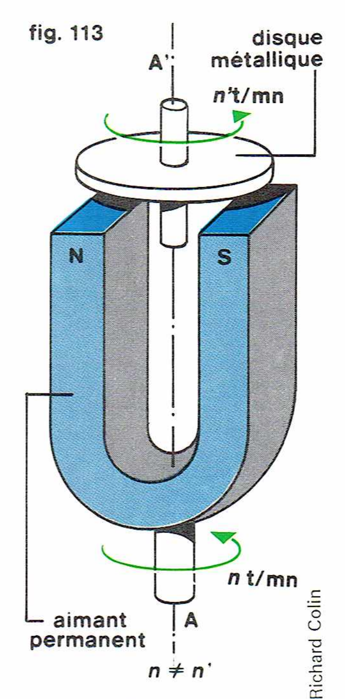
$$N = \frac{60\,f}{p}\,(1 - g)$$

* *Moteurs à cage d'écureuil* (*fig.* 114)

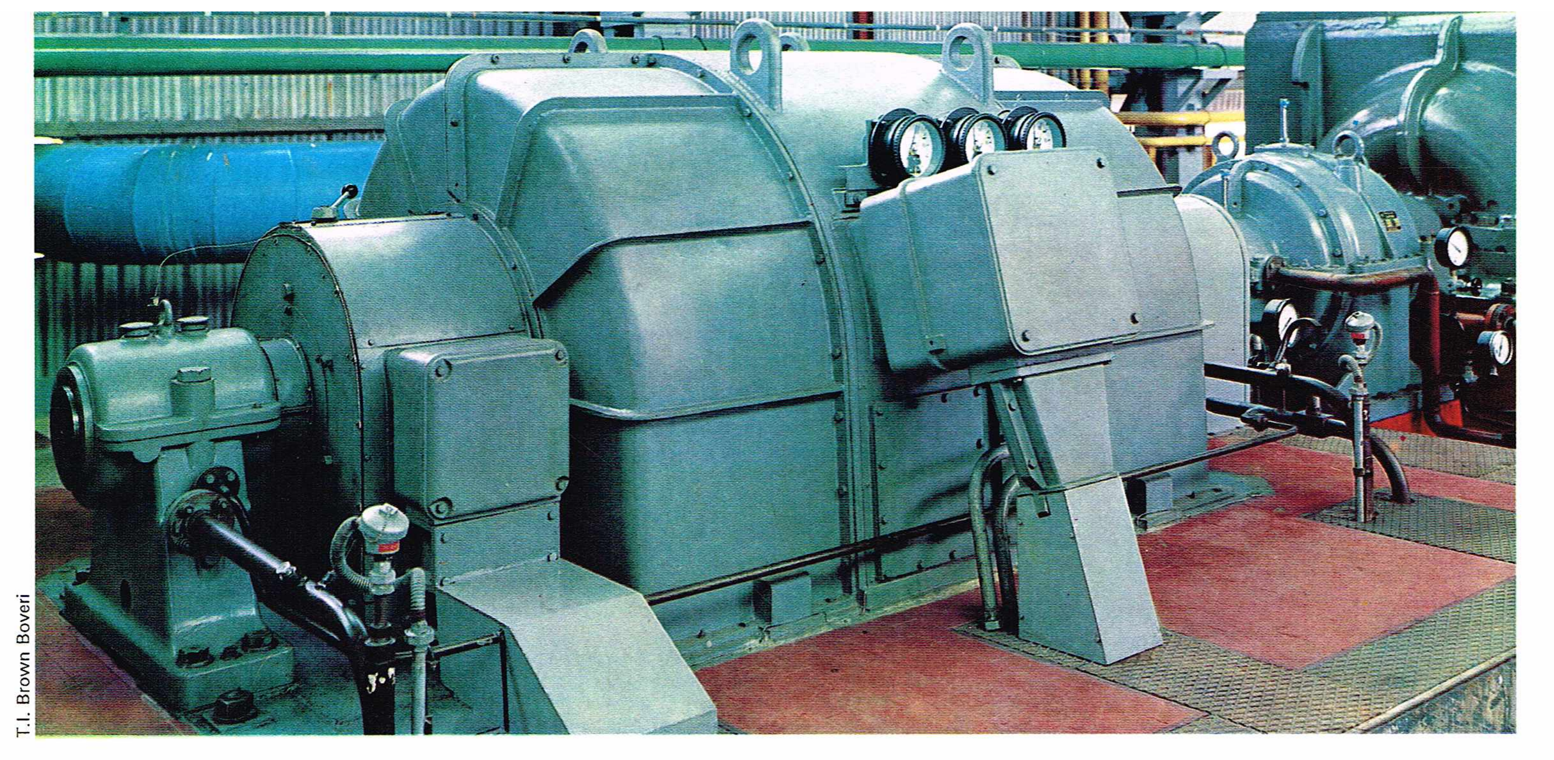
C'est sans doute le type le plus simple et le plus robuste de tous les moteurs électriques. Le rotor est constitué par des barres (cuivre, bronze ou aluminium) placées dans des encoches sur la périphérie du rotor, rappelant la cage d'écureuil dont ce type de moteur tire son nom. Ces barres sont réunies à chaque extrémité du rotor par des bagues de court-circuit. L'ensemble barres et bagues peut être obtenu directement par moulage sous pression d'aluminium dans le rotor. On démontre qu'une telle cage se comporte comme un enroulement polyphasé fermé sur lui-même. Le nombre de pôles d'une cage est toujours égal au nombre de pôles créés par l'enroulement du stator.

Le démarrage peut s'effectuer directement par mise sous pleine tension stator. Pour des moteurs puissants, ce type de démarrage se traduit par un appel de courant important qui peut ne pas être admissible pour le réseau. Les constructeurs ont amélioré les conditions de ce type de moteur dit à simple cage, soit par la double cage, soit par le moteur à barres profondes. Ces deux dispositifs permettent de réduire très nettement le courant de démarrage tout en augmentant le couple correspondant (*fig.* 115).

Une autre solution consiste à démarrer le moteur sous tension réduite. Une solution très employée est celle du démarrage « *étoile-triangle* ». Dans ce cas, les enroulements statoriques, dont toutes les bornes sont sorties, sont d'abord couplés en étoile, puis en triangle. On peut démarrer aussi à l'aide d'un autotransformateur. Dans ce cas, le démarrage peut être très progressif si plusieurs prises



▲ *Figure 113 : principe du moteur à induction.*

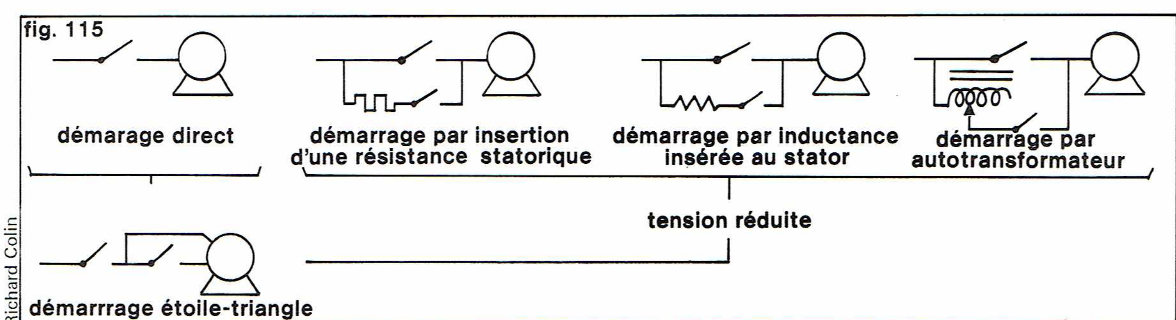


T.I. Brown Boveri

▲ *En haut, un moteur asynchrone triphasé.*

▸ *Figure 115 : principe de démarrage des moteurs à induction à cage.*

▼ *Figure 114 : les différentes pièces d'un moteur à rotor à cage; ici, moteur* CUIRACEM *série* L, *types 160 à 250.*



Richard Colin

fig. 114

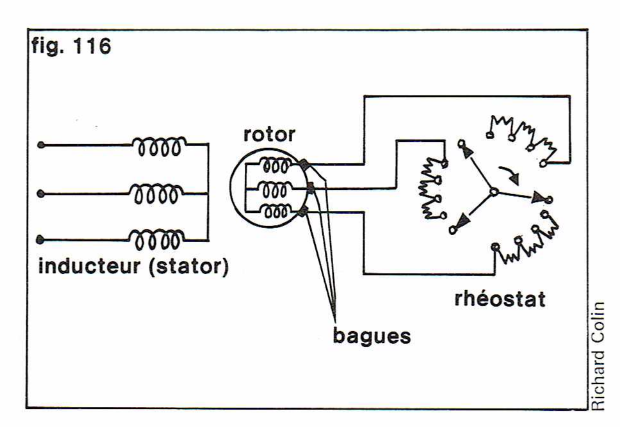
3-05
3-04
3-03
3-00
3-01
3-08
3-02
2-21
1-41 2-13 1-13 1-15 2-24 2-26
1-01 2-211 2-01 1-05 4-01 1-03 1-07 2-06 2-03 1-31 2-00 1-00

NOMENCLATURE DES PIÈCES

1-00. Stator bobiné (carcasse)
1-01. Enveloppe de ventilateur
1-03. Flasque-palier, côté opposé commande
1-05. Disque de fermeture côté opposé commande (éventuel)
1-07. Rondelle élastique
1-13. Flasque-palier côté commande
1-15. Disque de fermeture côté commande (éventuel)
1-31. Couvercle intérieur (éventuel)
1-41. Couvercle intérieur (éventuel)

2-00. Rotor
2-01. Ventilateur
2-03. Roulement côté opposé commande
2-06. Circlips (éventuel)
2-13. Roulement côté commande
2-21. Clavette de ventilateur
2-211. Jonc (éventuel)
2-24. Clavette de bout d'arbre
2-26. Vis et rondelle de bout d'arbre

3-00. Plaque de bornes
3-01. Support de plaque de bornes
3-02. Joint de fond de boîte à bornes
3-03. Fond de boîte à bornes
3-04. Joint de couvercle
3-05. Couvercle de boîte à bornes
3-08. Plaque d'obturation
4-01. Tiges de fixation des flasques



◀ *Figure 116 : représentation schématique d'un moteur à rotor bobiné.*

sont prévues. Le démarrage sous tension réduite peut enfin être effectué par insertion de résistances ou d'inductances dans le circuit des enroulements du stator.

* *Moteurs à rotor bobiné*

Ce type de rotor comporte un enroulement généralement triphasé connecté à trois bagues portées par l'arbre. Ces dernières sont branchées à un rhéostat approprié soit pour démarrer le moteur, soit pour permettre un réglage de sa vitesse (voir *fig.* 116).

Le démarrage est effectué avec le maximum de résistances en ligne avec les circuits du rotor. Les résistances sont ensuite séquentiellement éliminées jusqu'à ce que le moteur atteigne sa vitesse normale avec la mise en court-circuit de ses enroulements. De cette façon, un moteur à rotor bobiné peut développer un couple élevé avec un courant de démarrage réduit. La mise en court-circuit des enroulements peut être combinée avec le relevage des balais, de façon à leur éviter une usure inutile pendant la marche.

Les résistances extérieures peuvent être utilisées pour faire varier la vitesse. Celle-ci peut être réduite jusqu'à 50 % de sa valeur nominale. Ce procédé n'est pas très satisfaisant dans la mesure où il entraîne une perte sensible de rendement. D'autre part, les vitesses obtenues sur les différents plots du rhéostat ne sont pas indépendantes de la charge, ce qui peut être gênant dans certains cas.

Ce type de moteur est utilisé lorsqu'un couple élevé au démarrage est requis alors qu'un fort courant de démarrage n'est pas admissible. Il convient bien pour les applications où un démarrage progressif est désiré.

Moteurs à induction monophasés

Ces moteurs ont des performances bien inférieures aux moteurs à induction polyphasés. Leur emploi s'impose dès que la seule alimentation électrique dont on dispose est monophasée. Ce sont en général des moteurs de faible puissance que l'on rencontre dans les secteurs domestiques et industriels. Ces moteurs peuvent avoir plusieurs vitesses : 2, 3 ou 4 vitesses sont les solutions les plus répandues. L'obtention de plusieurs vitesses se fait soit en prévoyant plusieurs polarités indépendantes, soit par modification du branchement des enroulements à l'extérieur du moteur.

* *Moteurs à cage d'écureuil*

Le rendement de ces moteurs est faible, ainsi que leur facteur de puissance. Ils ont un autre inconvénient qui est celui de ne pas pouvoir démarrer sans un dispositif auxiliaire. En effet, le courant monophasé induit bien un champ tournant capable de faire tourner le moteur, mais incapable d'induire, rotor à l'arrêt, les courants d'induit susceptibles de produire le couple de démarrage. Il faut donc munir ces moteurs d'un dispositif auxiliaire de démarrage, ce qui permet de distinguer les différents types de moteurs suivants.

- *Moteur à démarrage par phase auxiliaire* (*fig.* 117)

Ce moteur est une machine à vitesse pratiquement constante, dotée de deux enroulements inducteurs : un enroulement principal et un enroulement auxiliaire ou enroulement de démarrage à 90° du premier. Cet enroulement auxiliaire crée un déphasage qui induit un couple permettant le démarrage et l'accélération du moteur. Quand la vitesse normale est atteinte, le circuit de l'enroulement auxiliaire est ouvert par un dispositif centrifuge porté par l'arbre, l'interrupteur étant disposé à l'intérieur du moteur. Le couple de démarrage de ce type de moteur n'est pas très élevé.

- *Moteur à démarrage par condensateur* (*fig.* 118)

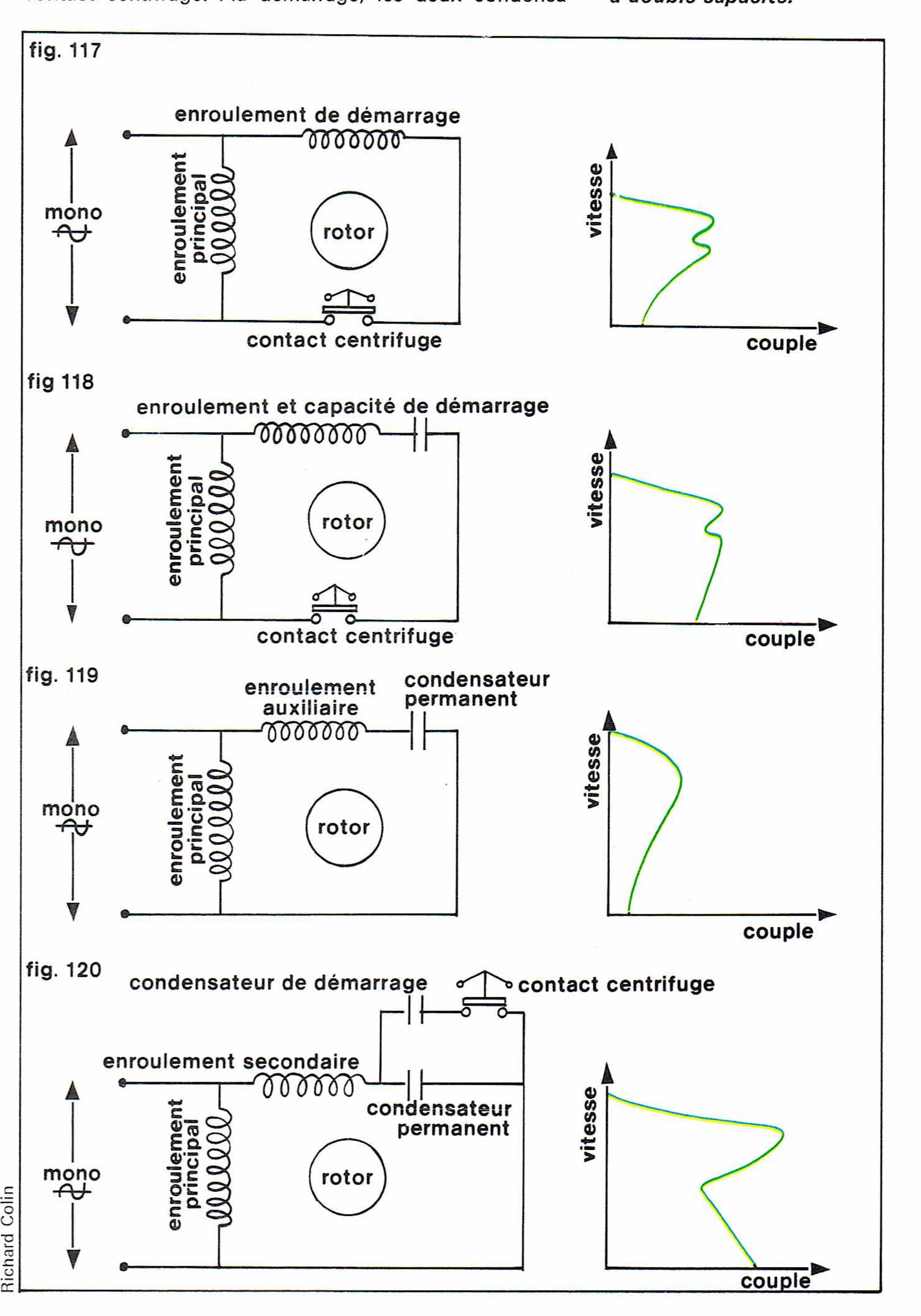
Ce moteur est très similaire au précédent. La seule différence est qu'il comporte dans le circuit de l'enroulement de démarrage une capacité. Cette disposition permet à ce moteur d'avoir un meilleur couple de démarrage et une plus forte accélération que le moteur muni d'une simple phase auxiliaire. Après élimination du circuit de démarrage, la caractéristique (C, N) de ce moteur est évidemment identique à celle du moteur précédent. Alors que sans condensateur la puissance des moteurs ne dépasse guère 200 W, on fait des moteurs à démarrage par condensateur jusqu'à des puissances de l'ordre de 5 kW.

- *Moteur à condensateur permanent* (*fig.* 119)

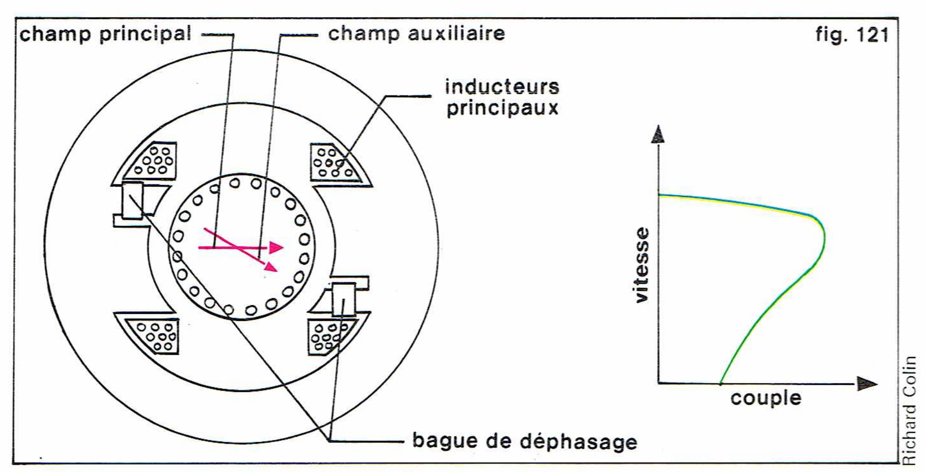
Ce moteur a un enroulement auxiliaire avec en série une capacité toujours alimentée. Cette disposition donne au moteur un bon facteur de puissance ; le couple de démarrage en revanche n'est pas très élevé. Son avantage est d'éviter le contact centrifuge, ce qui diminue sa taille.

- *Moteur à double capacité* (*fig.* 120)

Ces moteurs ont un enroulement auxiliaire permanent associé à un condensateur doublé par un deuxième condensateur pouvant être mis hors circuit par un contact centrifuge. Au démarrage, les deux condensa-



▼ *Figure 117 : moteur à induction monophasé à démarrage par phase auxiliaire.*
Figure 118 : moteur à induction monophasé à démarrage par condensateur.
Figure 119 : moteur à induction monophasé à condensateur permanent.
Figure 120 : moteur à induction monophasé à double capacité.



▲ *Figure 121 : schéma de principe et caractéristique* (C, N) *d'un moteur à induction monophasé du type bobine-écran.*

▼ *Figure 122 : moteur à induction monophasé à répulsion. Figure 123 : moteur à induction monophasé à démarrage répulsion. Figure 124 : moteur à induction monophasé à répulsion-induction.*

teurs sont en service ; à la vitesse nominale, le condensateur isolable est mis hors circuit, laissant en service l'enroulement auxiliaire et son condensateur.

Ce type de moteur a un couple de démarrage élevé et un bon facteur de puissance. C'est probablement le meilleur moteur à induction monophasé.

● *Moteur à bobine-écran* (*fig.* 121)

Ce moteur, appelé aussi moteur à bague de déphasage, se présente de la façon suivante. C'est un moteur à cage d'écureuil dans lequel la phase unique, semblable à celle des moteurs universels qui seront examinés plus loin, a ses deux pôles munis de deux bagues en court-circuit dont le but est de déphaser une partie du champ, créant ainsi un pseudo-champ déphasé qui est susceptible de faire tourner le moteur. Le couple obtenu est inférieur à celui d'un moteur à phase auxiliaire, mais il est suffisant pour de nombreuses applications.

fig. 122
balais
mono
enroulement stator
vitesse
couple
enroulement rotor

fig. 123
mono
enroulement stator
vitesse
couple
enroulement rotor
contact centrifuge

fig. 124
cage d'écureuil
mono
enroulement stator
vitesse
couple
enroulement rotor
Richard Colin

Ce moteur est donc de construction beaucoup plus simple que les moteurs examinés précédemment et se trouve par conséquent meilleur marché. Les performances sont faibles, en particulier le rendement et le facteur de puissance. Il se fait en plusieurs vitesses : 4 et 6 pôles. Une ventilation du moteur est bien souvent nécessaire.

* *Moteurs à rotor bobiné*

Ces moteurs monophasés à rotor bobiné comportent un collecteur et se présentent comme des moteurs à courant continu. L'alimentation se faisant en courant alternatif, l'inducteur comme l'induit doivent être feuilletés de façon à réduire les pertes par courant de Foucault. Ce type de moteur donne naissance à la famille des moteurs à répulsion qui font l'objet de ce présent paragraphe ainsi qu'à la famille des moteurs universels qui seront décrits plus loin.

● *Moteur à répulsion* (*fig.* 122)

On trouve sur le collecteur deux lignes de balais à 180° réunies en court-circuit et décalées par rapport à la ligne des pôles. Lorsque le moteur est alimenté, les enroulements inducteur et induit se comportent comme des électro-aimants tournants, dont les pôles de même nom se repoussent, d'où ce phénomène de répulsion qui fait tourner l'induit et qui a donné son nom au moteur.

● *Moteur à démarrage répulsion* (*fig.* 123)

Ce moteur est de type à répulsion, mais il possède un dispositif centrifuge qui court-circuite toutes les lames du collecteur une fois que le moteur a atteint une vitesse égale à 75 % de sa vitesse nominale. Le moteur fonctionne alors comme un moteur à induction monophasé à cage.

Ces moteurs à démarrage répulsion sont très utilisés dans l'industrie.

● *Moteurs à répulsion-induction* (*fig.* 124)

Ce moteur est également un moteur à répulsion mais son rotor comporte une cage d'écureuil sous son enroulement d'induit. La cage stabilise la vitesse et évite le dispositif centrifuge. Pour le dosage des effets de l'enroulement d'induit et de la cage d'écureuil, on peut ajuster les caractéristiques (CN) du moteur aux exigences du récepteur. Ce moteur enfin peut être utilisé si un couple élevé au démarrage est requis.

Moteurs synchrones

Les moteurs synchrones sont par définition des moteurs à vitesse constante. Ils fonctionnent en synchronisme avec la fréquence du réseau qui les alimente. Comme pour les moteurs à induction, leur vitesse est déterminée par le nombre de paires de pôles ; cette vitesse est donc toujours une fraction, mais une fraction exacte puisqu'il n'y a pas de glissement, de la fréquence du réseau.

Le principe du moteur synchrone peut être illustré (*fig.* 125) par un aimant permanent et une aiguille aimantée alignés suivant le même axe AA'.

Lorsque l'aimant tourne, il crée un « champ tournant » qui entraîne l'aiguille aimantée à la *même vitesse* de rotation.

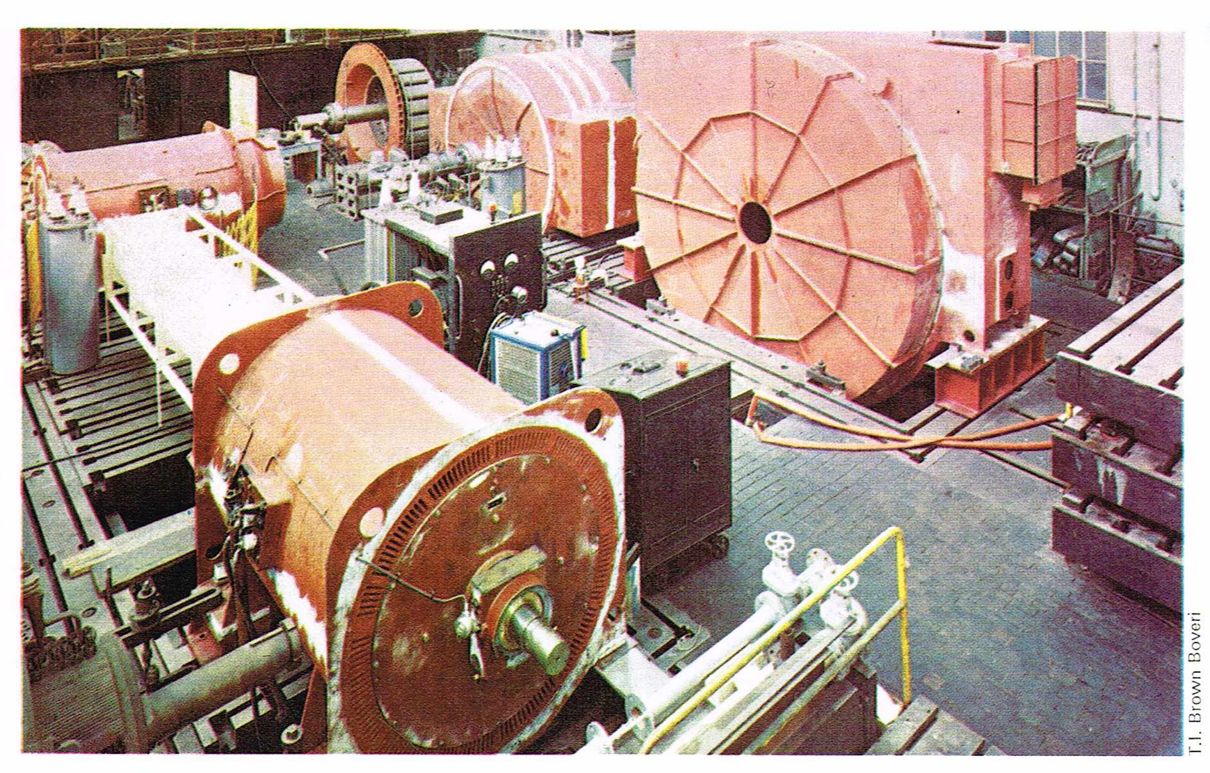
Sur un moteur, le champ tournant est réalisé électriquement par des enroulements statiques. Au démarrage, il faut lancer l'aiguille à la vitesse du champ pour qu'il y ait « accrochage ». Si le couple résistant devient trop fort, le moteur décroche.

La gamme de puissances de ces moteurs est très large. Elle va des petits moteurs sans excitation aux moteurs de forte puissance à excitation par courant continu. Les gros moteurs sont utilisés dans les applications où l'on recherche la vitesse constante d'une manière précise : groupes changeurs de fréquence par exemple. Le rendement de ces moteurs est excellent, d'où l'intérêt de les utiliser dans les fortes puissances.

Les moteurs sans excitation se contentent d'une alimentation simple (stator) et se présentent de ce point de vue comme les moteurs à induction.

Différents principes sont utilisés pour obtenir le synchronisme : on distingue principalement les moteurs à réluctance, les moteurs à hystérésis et les moteurs à aimants permanents. Ces moteurs peuvent fonctionner en polyphasé et en monophasé, mais ils sont généralement de faible puissance et fonctionnent en monophasé.

Les moteurs à excitation par courant continu sont des moteurs de puissance allant de quelques kilowatts à 20 MW environ. La source de courant continu nécessaire à l'excitation peut être indépendante du moteur ou constituée par une génératrice directement attelée à l'arbre de


T.I. Brown Boveri

◀ *Moteurs asynchrones et moteurs synchrones en cours de construction. A gauche, deux moteurs asynchrones pour la commande des ventilateurs. A droite, le premier est un moteur asynchrone pour la commande d'un compresseur alternatif ; le second est un moteur synchrone pour la commande d'un compresseur alternatif ; le troisième est le rotor du moteur précédent.*

la machine. Cette génératrice peut délivrer directement le courant continu nécessaire. On peut utiliser également un alternateur et des redresseurs tournants, ce qui évite les balais, toujours source d'ennuis. Ces moteurs sont en général triphasés.

Un moteur synchrone mono- ou triphasé ne peut démarrer tout seul, car il a besoin d'être lancé jusqu'à une vitesse proche de celle du synchronisme. Pendant le démarrage et avant synchronisation, il y a donc glissement du rotor. Pour les petits moteurs fonctionnant en monophasé, on a recours aux mêmes procédés que ceux utilisés sur les moteurs à induction (phase auxiliaire, démarrage par capacité, bobine-écran, etc.). Sur les moteurs triphasés, on munit le rotor d'une sorte de cage d'écureuil dans les épanouissements polaires, ce qui permet un démarrage en asynchrone.

Moteurs synchrones polyphasés

Ces moteurs sont en général des moteurs de forte puissance qui tournent à vitesse élevée (500 à 1 500 t/mn). Leur excitation est faite à partir de courant continu. Beaucoup d'entre eux sont munis d'une excitation sans balais par alternateur et redresseurs tournants.

On a déjà noté que le moteur synchrone pose un problème de démarrage. Bien que le moteur à excitation par courant continu possède une cage de démarrage, le couple peu élevé que celle-ci produit exige que des précautions soient prises. La séquence de démarrage doit comporter les étapes suivantes :

— fermeture des enroulements du rotor sur une résistance de démarrage ;
— mise sous tension totale ou réduite du stator ;
— excitation du rotor à la vitesse de synchronisation dans le même temps qu'on ouvre le court-circuit.

La fermeture des inducteurs sur une résistance de démarrage a pour but de limiter la tension induite entre les bagues, qui pourrait atteindre plusieurs millions de volts, rotor ouvert, et détruire les inducteurs.

La mise sous tension du stator peut être directe, soit sur l'ensemble des enroulements, soit sur une partie seulement dans un premier temps. Cette méthode est évidemment très brutale ; elle se traduit par un appel important de courant sur le réseau et entraîne des contraintes mécaniques sur les pièces tournantes. Le démarrage peut être corrigé par amélioration de la cage : double cage ou encoche profonde.

Le démarrage sous tension réduite convient mieux aux moteurs de forte puissance. Les différentes méthodes utilisées sont l'insertion d'une résistance ou d'une inductance en série avec le stator ou l'emploi d'un autotransformateur.

Les différentes méthodes de mise sous tension du stator au démarrage sont données sur la *fig.* 126. On constatera qu'elles ne diffèrent guère des méthodes utilisées pour les moteurs à cage d'écureuil.

Il existe aussi des moteurs synchrones polyphasés du type à réluctance dans la gamme de puissances inférieures à 20 kW. Ce type de moteur beaucoup plus utilisé en monophasé va être décrit dans le paragraphe suivant.

Moteurs synchrones monophasés

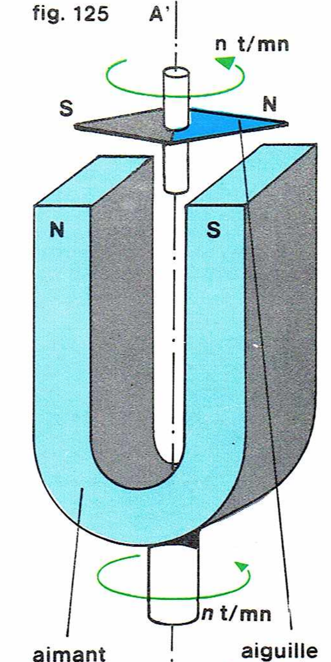
Ces moteurs ont seulement une alimentation simple sur le stator ; ils n'ont pas d'excitation extérieure.

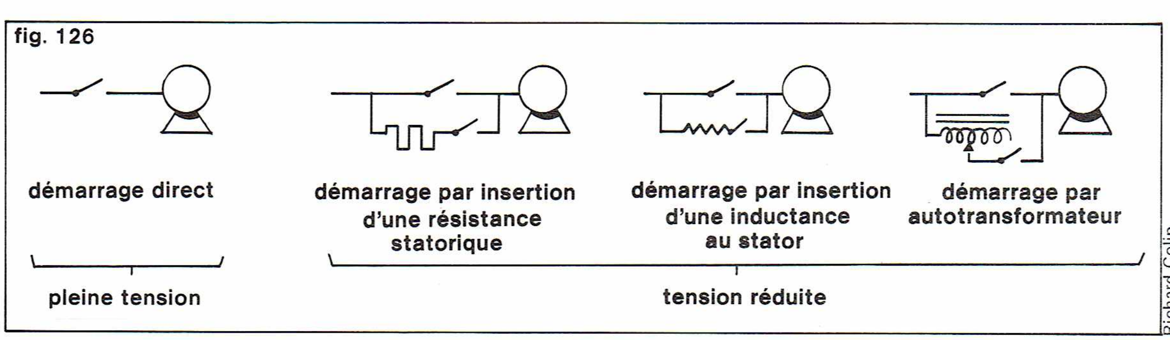
* *Moteurs à réluctance* (*fig.* 127)

Ces moteurs sont des moteurs à cage d'écureuil mais leur rotor, au lieu d'être lisse, c'est-à-dire à entrefer constant, présente des pôles saillants dont la réluctance est minimale par rapport aux intervalles où l'entrefer est plus important. L'espace entre les dents peut être comblé par de l'aluminium ; ainsi le rotor reste lisse et les barres d'aluminium constituent la cage de démarrage.

▼ *Figure 125 : principe du moteur synchrone.*

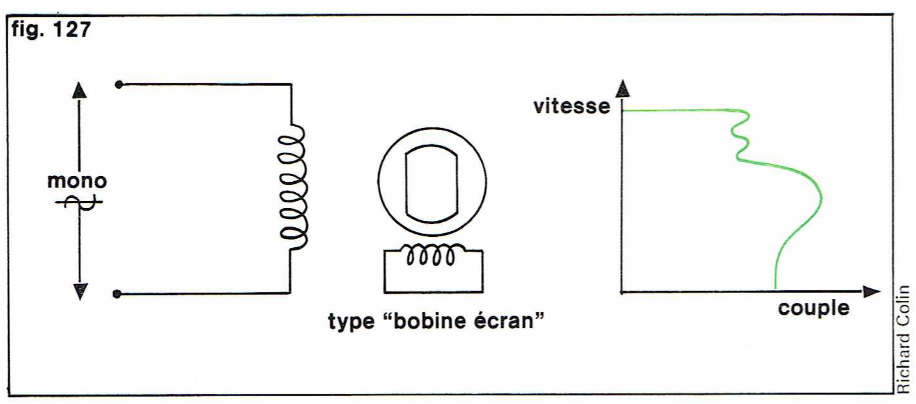
Richard Colin

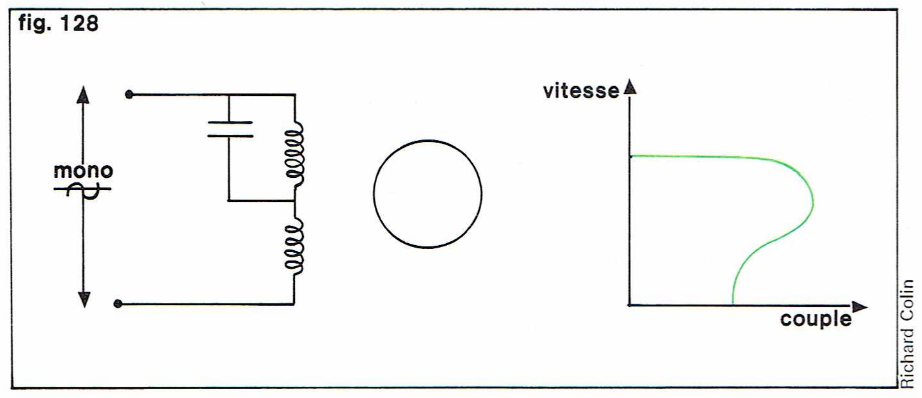




Richard Colin

◀ *Figure 126 : démarrage des moteurs synchrones polyphasés à excitation par courant continu.*





▲ *Figure 127 : moteur synchrone monophasé à réluctance : Figure 128 : moteur synchrone monophasé à hystérésis.*

▼ *Figure 129 : moteur synchrone monophasé à aimant permanent.*

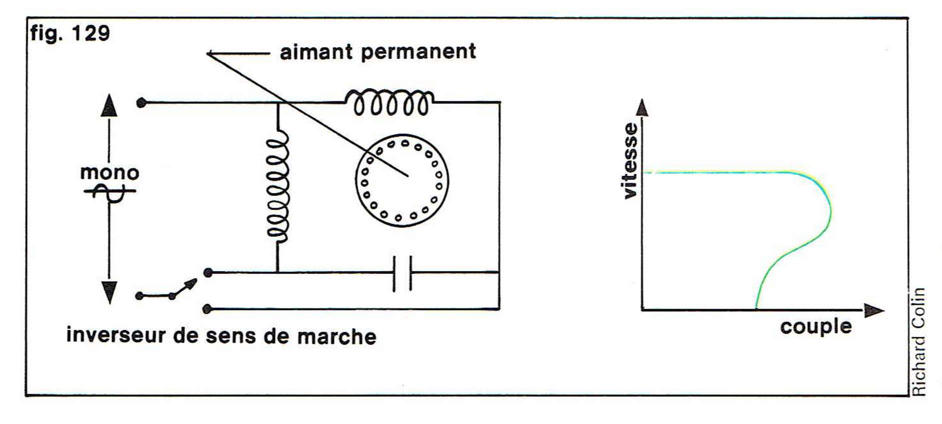
Le démarrage en monophasé s'effectue à l'aide des mêmes artifices que ceux employés pour les moteurs asynchrones monophasés (phase auxiliaire, condensateur, bobine-écran, etc.). Ces moteurs sont également en triphasé jusqu'à des puissances de l'ordre de 75 kW.

Ces moteurs ont un rendement et un facteur de puissance inférieurs à ceux des moteurs synchrones à excitation par courant continu et même à ceux des moteurs asynchrones. Mais leur qualité est d'être bon marché, simples et tout à fait adaptés aux applications où l'inertie du récepteur est faible, car il leur faut au démarrage atteindre la vitesse du synchronisme.

* *Moteurs à hystérésis* (*fig.* 128)

Le stator est semblable à celui d'un moteur à induction : il produit un champ tournant. Le rotor en revanche se présente, à la place des barres et des tôles feuilletées constituant une cage d'écureuil, comme un cylindre massif d'un matériau magnétique utilisé pour la fabrication des aimants. Ce moteur démarre du fait des pertes par hystérésis induites dans le rotor par le champ tournant. Au synchronisme, il s'accroche par aimantation de même polarité que le champ inducteur.

Contrairement au moteur à réluctance dont le couple moteur est ondulé à basse fréquence de par son principe même (glissement sur une largeur de dents), le moteur à hystérésis ne vibre pas. Pour cette raison, il est plus utilisé que le moteur à réluctance.



On peut monter des rotors à hystérésis sur la plupart des moteurs asynchrones monophasés, en particulier sur le moteur à bobine-écran. De tous les moteurs à hystérésis c'est le type le plus utilisé. On le rencontre sur tous les appareils de mesure de temps.

Ce type de moteur est habituellement monophasé ; il est quelquefois construit en polyphasé.

* *Moteur à aimants permanents* (*fig.* 129)

Il s'agit ici encore d'un moteur qui est muni d'une cage d'écureuil servant au démarrage, mais le rotor comporte en plus des aimants permanents qui constituent des pôles fixes. En fonctionnement, ces pôles s'accrochent sur le champ tournant.

Ces moteurs se développent en raison de leurs performances intéressantes tant sur le rendement que sur le facteur de puissance.

Moteurs universels

Le moteur universel est un moteur qui fonctionne indifféremment en courant alternatif ou en courant continu. Ses performances, dans les deux cas, sont sensiblement équivalentes. Il se présente comme un moteur à courant continu de type « série ». C'est donc un moteur à collecteur mais il se distingue du moteur série classique à alimentation continue par des détails constructifs. Les inducteurs, soumis à un champ alternatif, doivent être réalisés en tôles feuilletées, d'une part, et en nombre de spires de l'induit limité, d'autre part. Un moteur à courant continu peut fonctionner en alternatif mais avec un très mauvais rendement. Ainsi modifié, le moteur universel fonctionne convenablement sur les deux tensions. La vitesse pour une même tension est généralement plus forte en continu qu'en alternatif.

Le réglage de la vitesse d'un moteur universel est facile à réaliser puisqu'il est sensible aux variations de tension. Les moyens les plus classiques pour faire varier la tension peuvent donc être utilisés. Ils sont présentés sur la *figure* 130. Le réglage électronique est très utilisé, car il permet de conserver un fort couple moteur à faible vitesse, ce qui n'est pas le cas des autres systèmes de réglage.

Un des avantages du moteur universel sur les moteurs alternatifs à induction est de pouvoir fonctionner à des vitesses considérables, très supérieures à celle du synchronisme. Cela lui permet d'avoir sur ces autres moteurs une puissance massique très supérieure. Ce moteur peut supporter également des conditions de charge difficiles : à-coups et surcharges.

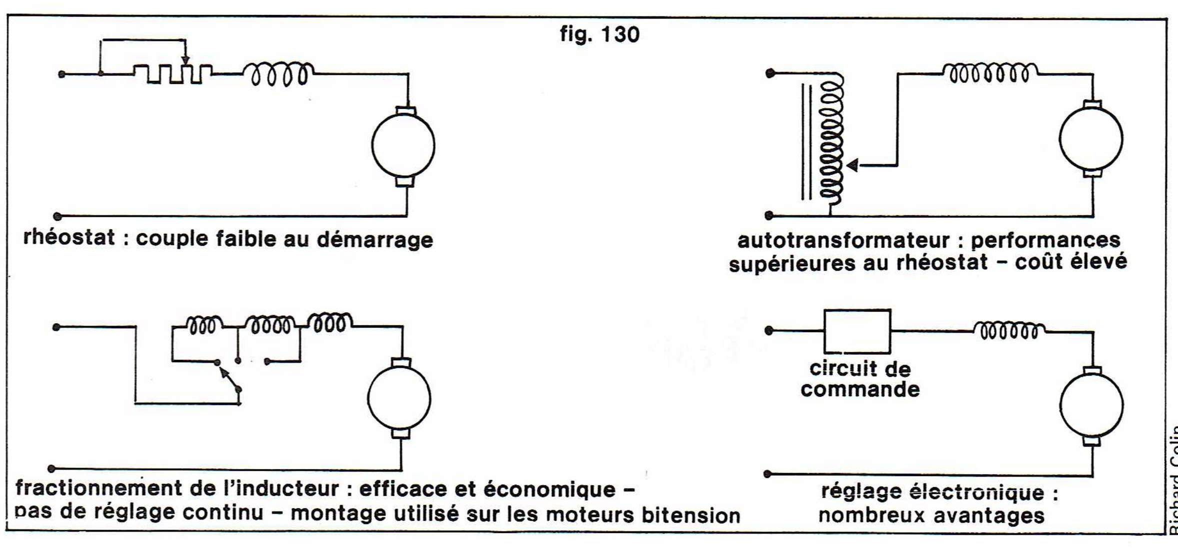
C'est donc un moteur doté de nombreuses qualités : couple de démarrage élevé, vitesse variable, puissance spécifique élevée, fonctionnement à fréquence variable, qui lui donneraient l'avantage sur les autres moteurs alternatifs si son temps de vie n'était pas limité par son collecteur. Les balais doivent être remplacés périodiquement. Ce type de moteur est réalisé dans une gamme de puissances allant de quelques watts à 1 500 kW. Il est surtout réalisé en petite puissance, et son domaine de prédilection est celui de l'électroménager où le fonctionnement est intermittent.

Moteurs à courant continu

Les moteurs à courant continu sont adoptés dans de nombreuses applications industrielles en raison de la facilité de réglage de vitesse qu'ils présentent. Ils sont préférés aux moteurs à courant alternatif dont le réglage de la vitesse est également possible, mais dans des conditions de coûts nettement plus élevées. Les moteurs peuvent fonctionner de façon continue dans une plage de vitesses allant de 1 à 8. Il est de plus possible de les faire fonctionner pour de courtes périodes à des vitesses très faibles.

Les moteurs à courant continu sont très appréciés également du fait de la possibilité d'adapter facilement leur courbe de caractéristique de couple, en fonction de la vitesse, aux exigences du récepteur, aussi bien en marche moteur qu'en marche en générateur puisque ce sont des machines parfaitement réversibles.

Ces machines sont capables de supporter des surcharges importantes par rapport à leurs caractéristiques nominales. Il est possible de freiner électriquement ces moteurs en récupérant même l'électricité produite. Il est possible de les stopper en un temps très bref, ce qui évite l'installation d'un dispositif mécanique de freinage.



Richard Colin

◀ ***Figure 130 : réglage de la vitesse des moteurs universels.***

Les moteurs à courant continu sont fabriqués dans une large gamme de puissances : moins d'un watt à plusieurs centaines de kW. Les tensions d'alimentation sont très variables selon les utilisations : 6 V à 1 000 V ou plus. Leur alimentation se fait sans difficulté à partir des réseaux de courant alternatif depuis l'apparition des semi-conducteurs au silicium (diodes et thyristors). Leur emploi s'impose dès lors qu'il est nécessaire de disposer de vitesses variables.

Réglage de la vitesse

Les moteurs, dont les inducteurs sont bobinés, sont classés habituellement d'après leur mode d'excitation :

— excitation indépendante ou dérivation (shunt) ;
— excitation série ;
— excitation composée (compound).

Il faut ajouter à ces moteurs les machines à aimants permanents ainsi que celles sans collecteur. Ces derniers types de moteurs n'existent que pour des puissances très faibles inférieures au cheval.

Le réglage de la vitesse peut s'obtenir de deux façons, la combinaison des deux pouvant aussi s'utiliser. On a vu en *Électrotechnique* que les grandeurs mécaniques (couple et vitesse) et les grandeurs électriques (tension U et intensité I) étaient liées par les relations suivantes :

(1) $$N = \frac{E}{kn\Phi} \quad \text{avec} \quad E = U - RI$$

(2) $$C = 60 \frac{nk}{2\pi} \Phi I$$

avec E force électromotrice, *n* nombre de conducteurs de l'induit, Φ flux inducteur.

On voit donc que la vitesse d'un moteur continu dépend d'abord de sa tension d'alimentation et de son flux **(1)**, ensuite, toutes choses restant égales, du courant absorbé c'est-à-dire de la charge **(2)**. On distingue donc :

— Réglage de la vitesse par la tension de l'alimentation : le réglage s'effectue par action sur la tension d'alimentation.

— Réglage de la vitesse par variation du champ : le réglage s'effectue à l'aide d'un rhéostat, dit rhéostat de champ, placé en série avec l'inducteur.

L'organisation des circuits de commande dépend évidemment du mode d'excitation des moteurs, tels qu'ils sont présentés ci-après.

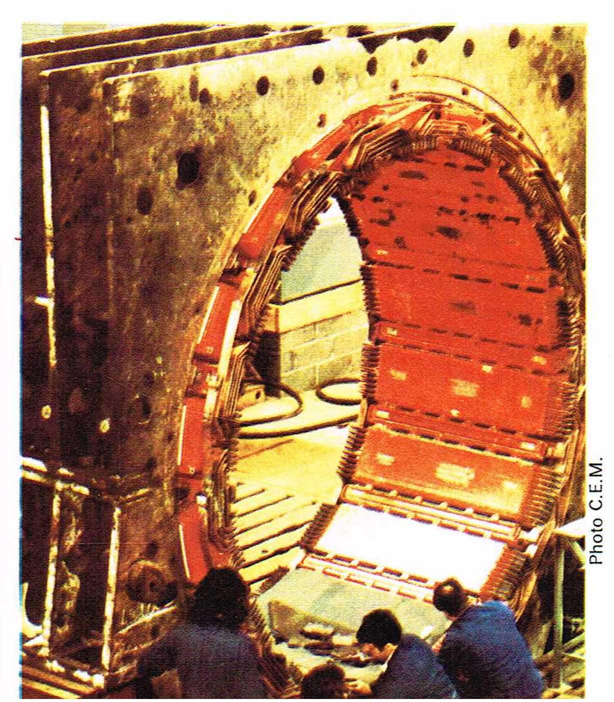
Une solution très employée, lorsqu'on veut qu'un moteur travaille dans une large gamme de vitesses avec, éventuellement, un freinage rapide et un renversement de marche, est celle constituée par le groupe *Ward-Leonard* (*fig.* 131). Le groupe comprend trois machines attelées sur le même arbre : un moteur asynchrone, une génératrice à courant continu et une excitatrice. L'excitatrice fournit le courant d'excitation au moteur à courant à excitation séparée.

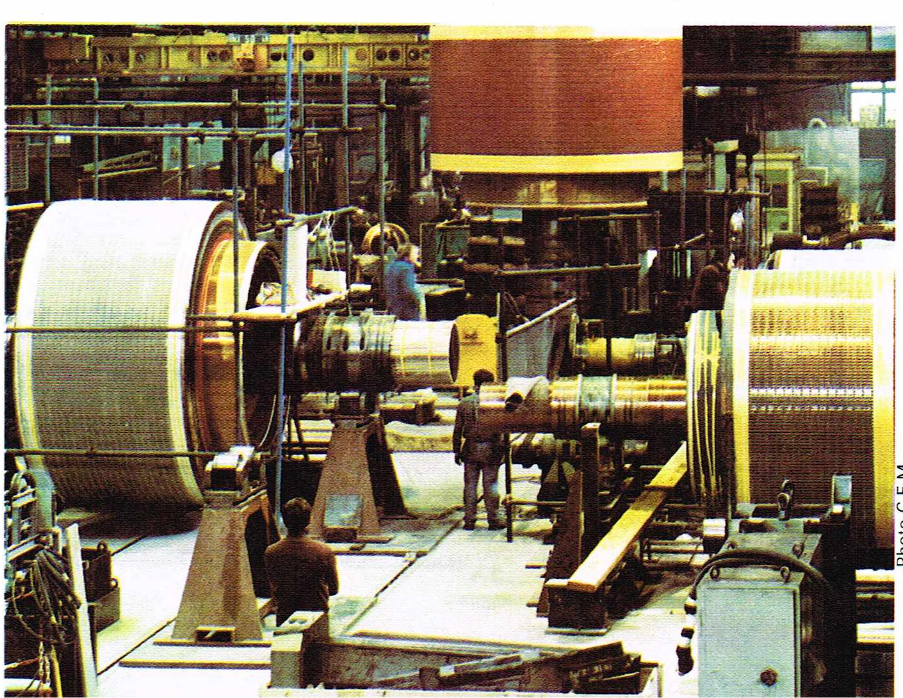
Ce système n'a pas un bon rendement puisque ce dernier est le produit des rendements de plusieurs machines, mais son extrême souplesse le fait utiliser dans de nombreux cas. Il est aujourd'hui concurrencé dans les petites puissances par les alimentations statiques qui fournissent le courant continu au moteur à partir d'un réseau alternatif.

Moteurs à excitation séparée ou dérivation

Ces deux types d'excitation (*fig.* 132) sont équivalents puisque l'excitation est la même pour une tension d'alimentation donnée. Dans les deux cas, le courant dans l'inducteur reste constant. Cela donne un moteur à vitesse pratiquement constante. Cependant, ces deux modes

▼ ***Stator (à gauche) et rotors (à droite) de moteurs à courant continu destinés aux laminoirs du complexe sidérurgique de Huta Katowice en Pologne et construits à Nancy (caractéristiques : 6 000 kW, 65 à 165 t/mn et 3 000 kW, 75 à 190 t/mn ; 1 210 V).***


Photo C.E.M.


Photo C.E.M.

d'excitation diffèrent s'il y a variation de la tension d'alimentation ; en effet, il y a, pour le moteur dérivation, modification du flux avec la tension, ce qui se traduit par des variations de vitesse plus faibles que lorsque l'excitation, donc le flux, reste constante. On recourt donc au moteur à excitation séparée lorsqu'on veut obtenir un réglage de vitesse important par variation de la tension d'alimentation.

Ces deux types d'excitation sont utilisés lorsqu'on souhaite que la vitesse ne soit pas sensible aux variations de charge.

Les moteurs sont en général alimentés par un dispositif donnant une tension variable, ce qui permet de les démarrer simplement sans aucun artifice de démarrage.

Moteurs à excitation série

Dans ce type de moteur, les enroulements de l'inducteur sont en série avec le circuit d'induit (*fig.* 133). Les deux circuits sont donc parcourus par le même courant. Au démarrage du moteur, le courant est maximal, ce qui se traduit par un flux important et un couple de démarrage important. Quand la vitesse du moteur augmente et que l'intensité diminue, le flux se réduit parallèlement. A la limite, le moteur risque l'emballement à la charge nulle. Sur les petits moteurs, le danger est inexistant en raison des frottements relativement importants des paliers, des balais et de la perte dans l'entrefer. Pour les moteurs de puissance notable, il faut éviter le risque de survitesse et on n'emploie pas ces moteurs dans des applications où la charge peut disparaître brusquement (par rupture de courroie par exemple).

Ces moteurs en revanche conviennent très bien chaque fois qu'un couple important au démarrage est nécessaire. Cette remarque explique pourquoi ces moteurs sont principalement utilisés dans les applications de traction où les deux caractéristiques : couple de démarrage élevé et charge croissante avec les vitesses, se présentent.

Moteurs à excitation composée

Ces moteurs comportent deux enroulements inducteurs, l'un de type « dérivation », l'autre de type « série » (*fig.* 134).

Cette disposition permet d'éviter l'inconvénient du moteur « série ». En effet, sur le moteur à excitation composée, en cas de charge nulle, le courant dans l'inducteur série est si faible que l'excitation est pratiquement déterminée par l'inducteur dérivation. A charge nominale, la vitesse dépend évidemment du flux résultant de la somme des deux flux inducteurs. La variation de vitesse avec le couple ressemble alors à celle du moteur série.

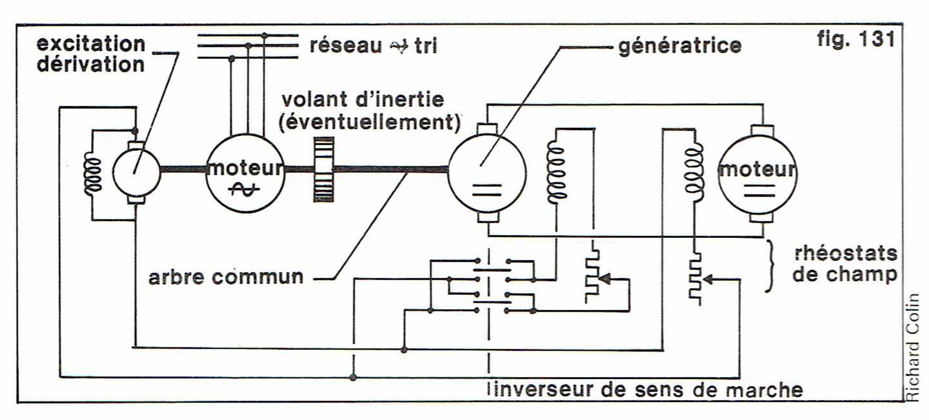
On peut distinguer les moteurs à flux additionnel dans lesquels les deux flux inducteurs ajoutent leurs effets, et les moteurs à flux différentiel dans lesquels le flux de l'inducteur série se retranche de celui de l'inducteur dérivation. En fait, on construit surtout des moteurs à flux additionnel qui ont ainsi des caractéristiques intermédiaires entre celles des moteurs série et celles des moteurs dérivation. La chute de vitesse en charge est plus grande que celle du moteur dérivation, mais l'enroulement dérivation évite l'emballement à charge nulle. Le couple au démarrage est élevé.

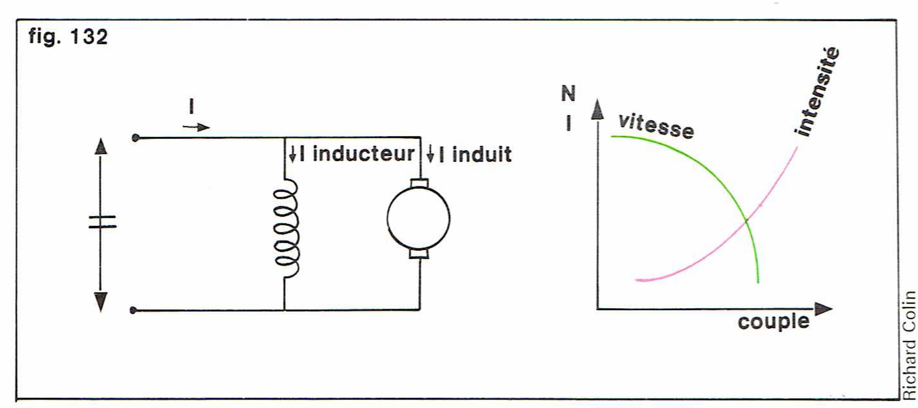
L'inversion du sens de marche pose une difficulté, car il faut inverser soit la polarité des inducteurs, soit celle de l'induit. Pour cette raison, les moteurs à deux sens de marche ne sont construits que pour des fortes puissances. On utilise en revanche l'excitation composée pour toutes sortes de moteurs à un seul sens de marche dans lesquels il faut améliorer le couple de démarrage.

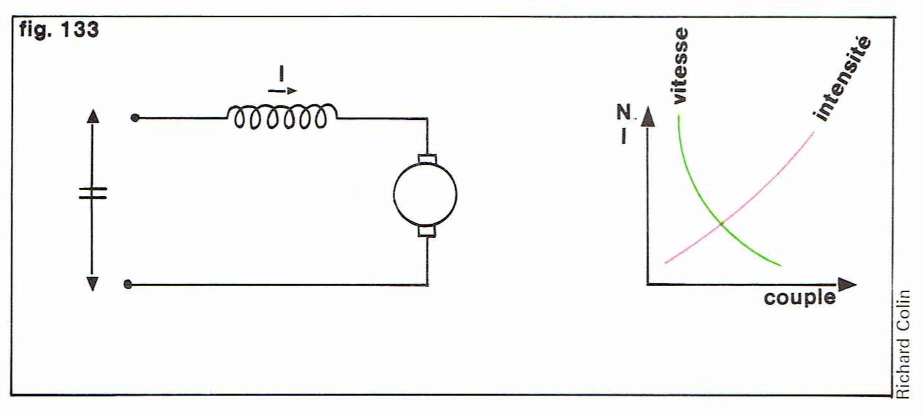
Moteurs à aimants permanents

Dans ces moteurs (*fig.* 135), le champ inducteur est créé par des aimants permanents avec une ou plusieurs paires de pôles. L'induit alimenté en courant continu, l'interaction entre le flux et les courants de l'induit crée le couple. Le flux reste constant quel que soit le régime de fonctionnement du moteur. Les caractéristiques (C, N) et (C, I) sont linéaires.

Ce type de moteur se construit des plus faibles puissances jusqu'à des puissances de quelques kilowatts. Il présente un certain nombre d'avantages sur les moteurs dont le flux est créé par des enroulements : pas de circuit d'alimentation, robustesse, danger nul de survitesse par perte du flux. D'autre part, les pertes des enroulements inducteurs des autres moteurs ainsi que la ventilation

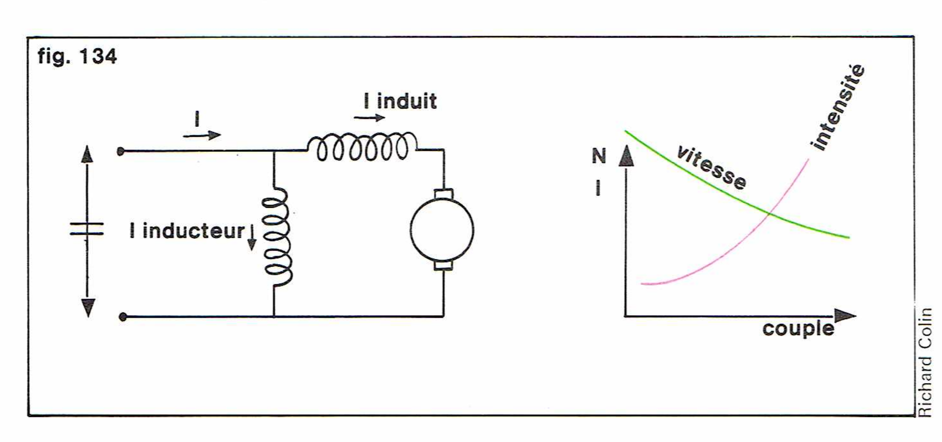






▲ *Figure 131 : représentation schématique du groupe Ward-Leonard.*
Figure 132 : moteur continu à excitation dérivation (shunt).
Figure 133 : moteur continu à excitation série.

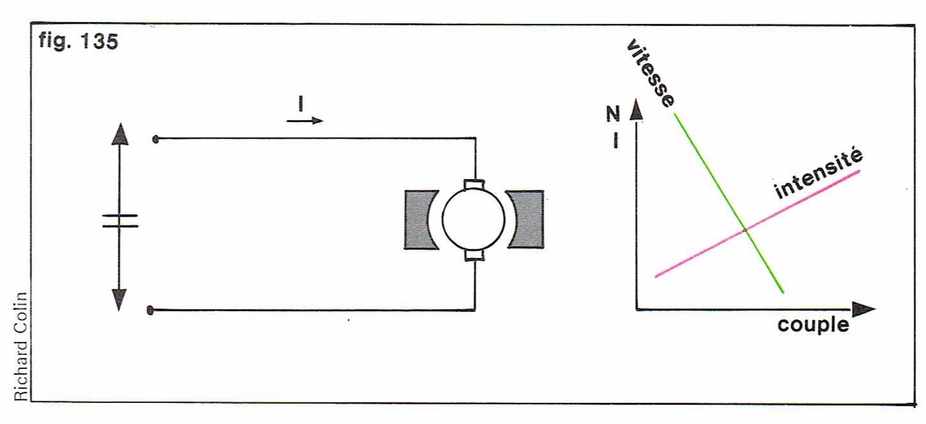
▼ *Figure 134 : moteur continu à excitation composée (compound).*



que ces pertes nécessitent n'existent plus sur ce moteur. Par ailleurs, l'absence de bobines inductrices supprime toute possibilité de réglage de la courbe (C, N). De plus, les surcharges peuvent entraîner une démagnétisation des inducteurs et par voie de conséquence une détérioration des caractéristiques mécaniques du moteur. La restauration de la magnétisation des masses polaires reste toujours possible.

Comme moteur de puissance, le moteur à aimants permanents est de taille plus importante et de prix plus élevé qu'un moteur dérivation de puissance équivalente. Si on ajoute aux prix des moteurs nus les circuits auxiliaires, l'avantage vient au moteur à aimants permanents.

On fait en petite puissance des moteurs à aimants permanents dont l'induit est un circuit imprimé.



▲ ***Figure 135 : moteur continu à excitation par aimant permanent.***

Commande des moteurs

Cette commande est réalisée de différentes façons, selon le type de moteurs à commandes.

Moteurs à courant alternatif

Moteurs à induction à cage

* *Démarrage sous pleine tension*

Ce type de démarrage convient bien aux moteurs à vitesse unique comme les moteurs à cage d'écureuil.

Le problème est d'appliquer la pleine tension aux bornes du moteur.

Pour des moteurs de très faible puissance, un interrupteur suffit. Des fusibles de protection sont placés sur l'alimentation pour éviter la marche en surcharge du moteur.

Au-delà d'une certaine puissance qui ne dépasse pas quelques kilowatts, on utilise la commande par contacteur. Un contacteur se compose d'une bobine de manœuvre et de contacts mobiles qui peuvent fermer un circuit en s'appliquant sur des contacts fixes. L'utilisation d'un contacteur permet la duplication et surtout l'automatisation de la commande. Quand il est demandé au moteur d'inverser son sens de marche, on utilise le montage classique du « contacteur-inverseur ».

Le démarrage sous pleine tension offre les avantages d'un appareillage très simplifié, d'où l'impossibilité de fausse manœuvre. Le courant de démarrage est malheureusement très important.

* *Démarrage sous tension réduite*

Ce type de démarrage est utilisé pour démarrer les gros moteurs et limiter l'appel de courant sur le réseau. Trois procédés sont utilisés.

Tout d'abord, le plus répandu pour les petits moteurs parce que le plus simple : le *démarrage par résistance insérée au stator.*

Ensuite le *démarrage par inductance insérée au stator* qui présente le même schéma que le dispositif précédent à l'exception de la résistance qui est ici remplacée par une inductance. La qualité du démarrage est meilleure sans pour autant que cet avantage apparaisse comme décisif. Si l'inductance est variable, on obtient alors un réglage de vitesse qui peut être apprécié dans certaines applications.

Le troisième système utilise un *autotransformateur.* Il est utilisé lorsqu'il est nécessaire de limiter fortement le courant de démarrage. Il permet, comme l'inductance variable, le réglage de la vitesse pendant le démarrage, mais cette possibilité est dans les deux cas coûteuse.

Il existe un autre système qui n'est pas à proprement parler un système de démarrage sous tension réduite : c'est le *démarrage « étoile-triangle ».* L'enroulement inducteur est connecté au réseau en étoile lors de la mise sous tension et reconnecté en triangle en fin de démarrage. Le courant de démarrage et le couple correspondant représentent environ 30 % des valeurs du démarrage sous pleine tension. Ce procédé n'est convenable que pour des démarrages à faible charge.

Moteurs à rotor bobiné

Le démarrage de ces moteurs se fait à l'aide d'un rhéostat (résistances réglables) placé sur le circuit, sorti par des bagues tournantes du rotor bobiné. La manœuvre peut être manuelle ou automatique. Dans ce dernier cas, l'élimination successive des portions de résistance se fait suivant des critères de courant, de temps ou de vitesse (contact centrifuge).

On utilise aussi aujourd'hui des dispositifs statiques pour le démarrage de ces moteurs.

Moteurs synchrones

Le système de démarrage d'un moteur synchrone comprend quatre composants :

— le système de mise sous tension alternative triphasée du stator ;

— le contacteur de mise sous tension continue du rotor ;

— un système de surveillance de la synchronisation qui ouvre en cas de défaut le circuit d'alimentation du rotor ;

— un système de protection de la cage de démarrage qui ouvre le circuit stator en cas de marche prolongée en asynchrone.

Moteurs à courant continu

Ces moteurs sont mis sous tension et démarrés par des interrupteurs à commande manuelle ($P < 1,5$ kW) ou par des contacteurs. On a vu que le couple de démarrage de ces moteurs est toujours satisfaisant. Le passage d'un courant plus élevé qu'à la vitesse nominale dans le collecteur (commutation) ne pose pas de problèmes particuliers, étant donné que la vitesse est limitée.

Pour les gros moteurs, une résistance de démarrage du courant d'induit est nécessaire. Cette résistance peut être éliminée progressivement par un rhéostat. Si la commande se fait par contacteur, la résistance est fractionnée et ses différentes parties sont éliminées successivement comme pour les moteurs alternatifs à rotor bobiné. En démarrage automatique, on utilise, pour la commande d'effacement des fractions de résistance, des critères de courant, de temps ou de vitesse.

Protection et commande

Au moteur électrique proprement dit, viennent s'ajouter des circuits d'alimentation, de commande et de signalisation qui compliquent notablement le branchement du moteur à son réseau d'alimentation. L'ensemble de ces circuits, plus ou moins complexes suivant le cas considéré, doit répondre à trois objectifs de protection :

— protection du personnel ;

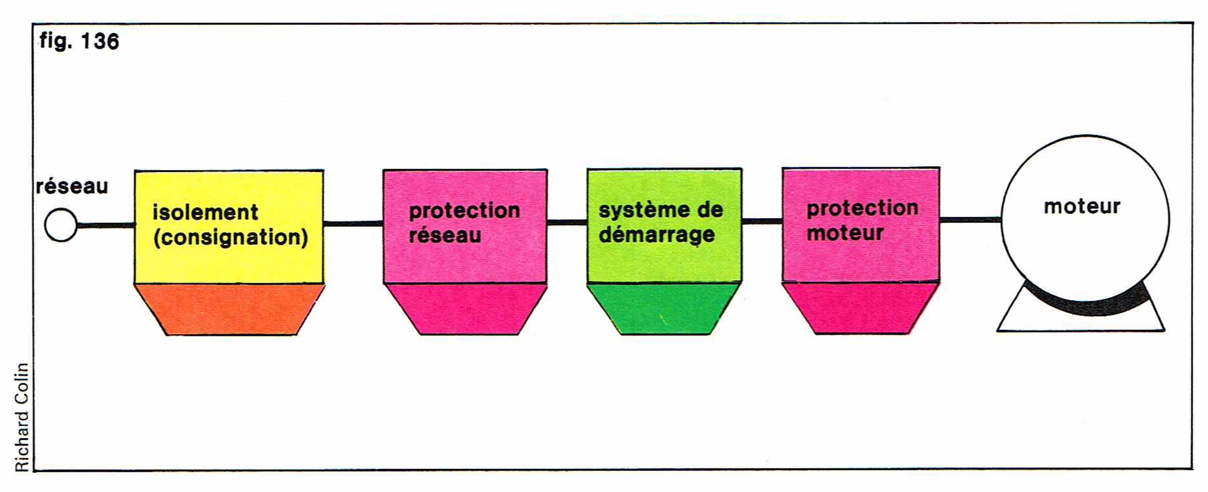
— protection du réseau ;

— protection du moteur.

Protection du personnel

Celle-ci est réalisée de deux façons. Pour le personnel d'exploitation, on évite en général, après une panne du réseau, que le moteur ne se remette en route tout seul lors du retour de la tension. Le circuit de commande du contacteur est conçu pour satisfaire à cette condition. Si l'on souhaite le redémarrage du moteur, indépendamment d'une action d'opérateur, et c'est le cas pour toutes les machines fonctionnant en automatique de façon intermittente, on protège alors mécaniquement les parties tournantes et il est clairement indiqué dans le voisinage du moteur que celui-ci peut démarrer de façon impromptue. Pour le personnel d'entretien, il est prévu un système d'ouverture de la ligne englobant tous les circuits auxiliaires. Le but recherché ici est d'abord la mise hors-tension du moteur et de ses circuits associés de façon à permettre le travail d'entretien ou de réparation « hors-

▶ *Figure 136 : schéma de principe des circuits d'un moteur électrique.*



tension »; ensuite, par une consignation de l'organe d'ouverture du circuit, on évite le retour intempestif de l'alimentation pendant la période de travaux.

Protection du réseau

En cas de court-circuit sur le moteur, il faut éviter que celui-ci ne se propage vers le réseau d'alimentation et n'induise des accidents sur des matériels placés en amont. Les organes chargés d'assurer cette protection appartiennent aux types suivants :

— fusibles,

— déclencheurs ampèremétriques (à action mécanique),

— relais ampèremétriques (à action électrique).

Protection du moteur

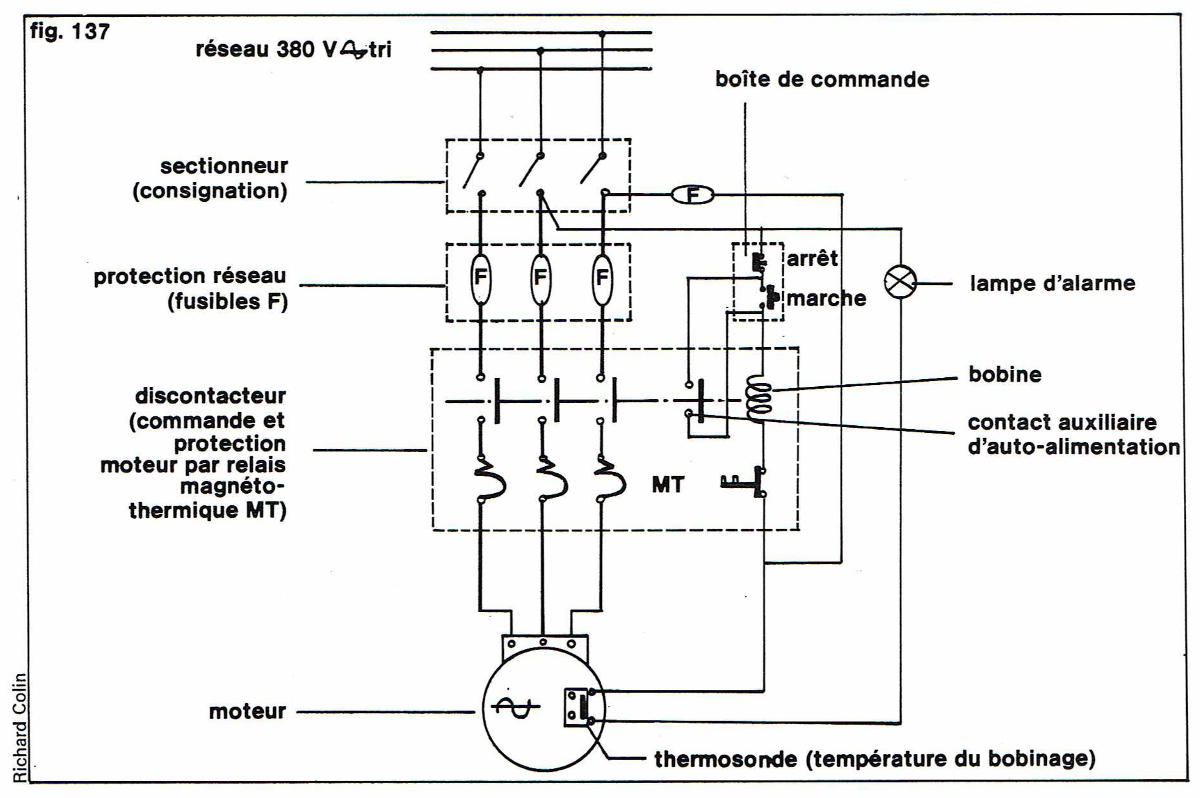
Il faut enfin protéger le moteur en l'arrêtant si sa température de fonctionnement devient anormale. On a vu qu'une augmentation même minime de température entraîne un vieillissement accéléré des isolants. Cette protection est assurée par des relais thermiques qui limitent l'intensité du moteur et par des thermosondes, placées à l'intérieur des bobinages du moteur.

Ces différents appareils de protection se combinent avec les appareils de protection de la ligne ou avec le contacteur pour former des appareils de commande et de protection intégrés.

On trouvera sur la *figure* 136 un schéma de principe des circuits de protection d'un moteur. La *figure* 137 donne un exemple d'un circuit complet de télécommande et de protection d'un moteur à induction triphasé à démarrage direct et un seul sens de marche.

BIBLIOGRAPHIE

Techniques de l'ingénieur, édition, 21, rue Cassette, 75006 Paris. – *Handbook of Chemistry and Physics,* 49th Edition, 1969, The Chemical Rubber Co. – *Génie atomique* (INSTN Saclay, P.U.F.), 1967 – VINER L., *Turbines à vapeur et à gaz,* éd. Albin Michel, 1965. – A. HOWBERECHTS, *les Turbines,* Vander éd., 1972. – THURIET L., *l'Énergie nucléaire,* éd. Dunod, 1976. – *Machine Design, Electric Motors and Controls,* Penton Inc., 1976. – Revue *Power,* Mc Graw Hill Publications, 1975-1976. – *Notices techniques des centrales thermiques,* SPT-E.D.F. – *Encyclopédie internationale des sciences et des techniques,* Presses de la Cité, 1973. – *Journées d'information astronautique,* Société française d'astronautique, 1960. – Revue *Power Engineering,* Bamington Ill., 1975-1976. – *Encyclopedia of Energy,* Mc Graw Hill, 1976. – RICARD J., *Équipement thermique des usines génératrices d'énergie électrique,* Dunod, 1962.



▶ *Figure 137 : exemple d'un circuit complet de télécommande et de protection d'un moteur à induction triphasé à démarrage direct et un seul sens de marche.*

TRANSFORMATIONS DE L'ÉNERGIE

Après ces chapitres consacrés aux « conversions » de l'énergie, nous abordons ici les « transformations » de l'énergie. Il nous faut sans tarder rappeler au lecteur que cette distinction entre conversion et transformation n'a jamais été consacrée par l'usage. Les praticiens utilisent généralement dans le même sens les deux mots. Pour découper le volumineux sujet des métamorphoses de l'énergie, nous nous sommes permis d'introduire cette distinction entre la « conversion » après laquelle l'énergie finale a pris une forme différente de l'énergie initiale et la « transformation » qui ne change pas la forme de l'énergie mais simplement en modifie les grandeurs caractéristiques. Il nous a paru commode d'adopter cette terminologie, car, d'une part, elle permettait une présentation rationnelle du sujet et, d'autre part, elle s'appuyait sur certaines habitudes de langage qui semblent la justifier.

En effet, nous connaissons le « transformateur » électrique qui modifie la caractéristique de tension du courant sans changer la nature électrique de l'énergie transférée par ce transformateur. Les électriciens appellent « convertisseurs » des groupes tournants dont la fonction est de modifier la fréquence du courant et éventuellement sa tension. Il n'y a pas ici apparemment modification de la forme de l'énergie entre l'état initial et l'état final : il s'agit toujours d'énergie électrique. Mais si on regarde de plus près le fonctionnement d'une telle machine, on s'aperçoit que son principe repose sur une double conversion d'énergie : un moteur transforme l'énergie électrique initiale en énergie mécanique dans une première conversion, et cette énergie mécanique sert à entraîner une génératrice qui délivre le courant désiré, et c'est la deuxième conversion. Il n'est donc pas choquant d'appeler une telle machine un convertisseur.

Si notre vocabulaire manque ainsi de précision, c'est généralement parce que dans le domaine de la technologie, les praticiens sont intervenus avant les théoriciens. Les différentes machines ont vu le jour dans un ordre qui tenait plus du hasard que de la logique et les vues d'ensemble sont venues alors que le vocabulaire existait déjà.

Le lecteur est à présent prévenu et nous pouvons revenir au problème des transformations de l'énergie. La distinction entre transformation et conversion apparait clairement sur le *tableau* I déjà présenté au chapitre de la conversion et que nous reproduisons ici, et sur le *tableau* I bis. On voit immédiatement que les transformations occupent les cases placées sur la diagonale alors que les conversions occupent le restant du tableau.

Comme il y a six formes d'énergie, nous allons trouver six familles de transformations. Dans ce chapitre, seront traitées en détail trois d'entre elles :

— énergie thermique en énergie thermique ;
— énergie mécanique en énergie mécanique ;
— énergie électrique en énergie électrique.

Les trois dernières transformations feront seulement l'objet de quelques commentaires dans un dernier paragraphe.

Avant de clore cette introduction, revenons au point de départ de la définition de l'énergie. Celle-ci est, en général, comme on l'a montré, le résultat du produit de deux grandeurs, l'une dite extensive, l'autre intensive. Le *tableau* II rappelle le nom de ces grandeurs pour les trois formes d'énergie dont les transformations vont être examinées ci-après. Comme on peut le noter, on peut écrire d'une façon générale et sous une forme différentielle :

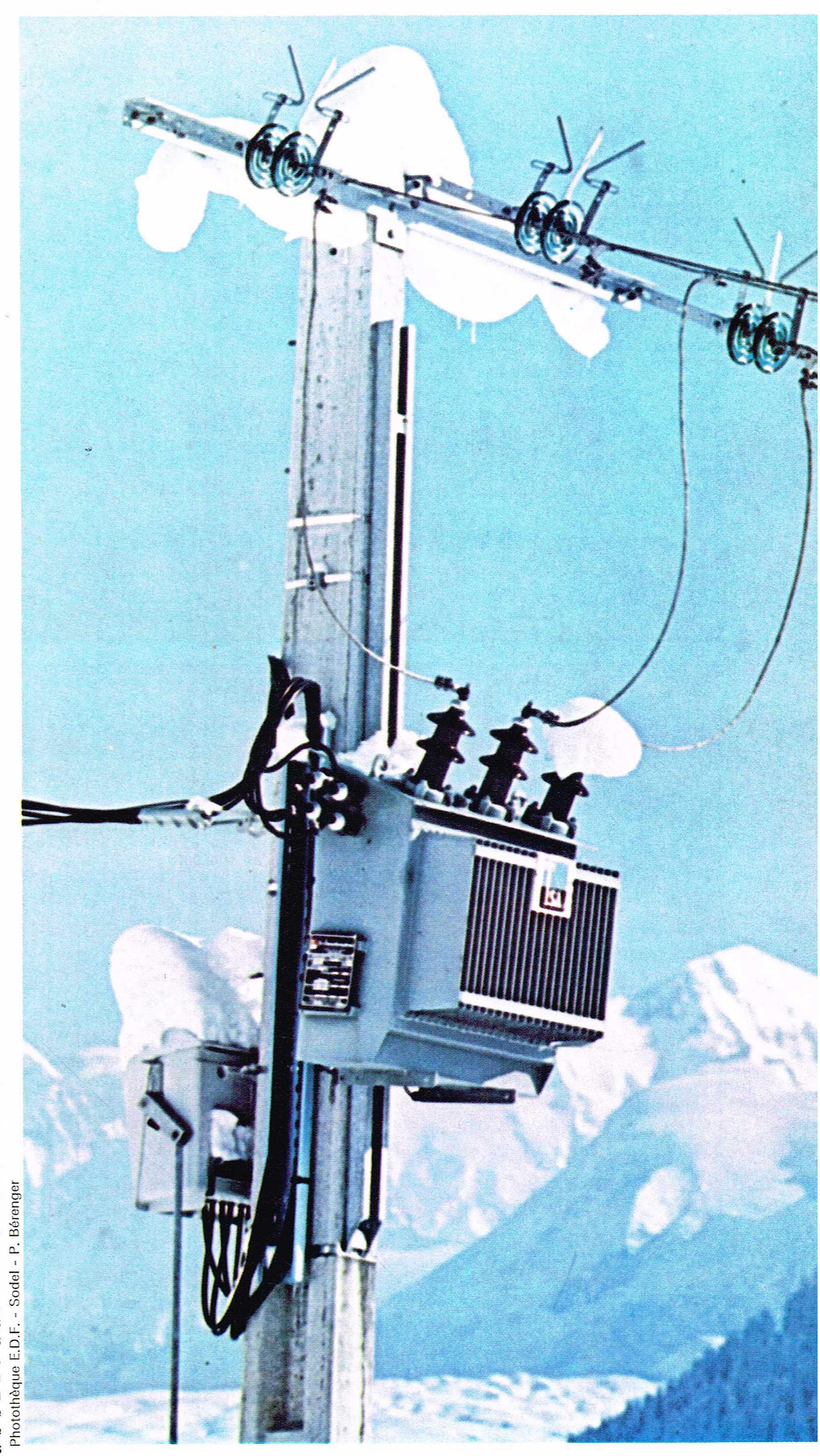
$$d\varepsilon = x \cdot dy$$

avec x : facteur de tension, et y : facteur de quantité.

L'analogie ne doit pas être poussée trop loin, car ces différents facteurs possèdent des propriétés spécifiques en fonction de la forme d'énergie à laquelle ils s'appliquent.

On peut simplement dire que, lorsqu'il y a transformation d'énergie, le facteur de quantité se conserve. Ayons à l'esprit le transformateur électrique pour illustrer ce principe : la quantité d'électricité prélevée au secondaire est identique à celle fournie par le primaire (aux pertes près), seul le facteur de tension U change.

Lorsque plusieurs systèmes possédant des énergies de même nature ont le même facteur de tension, les facteurs



Photothèque E.D.F. - Sodel - P. Bérenger

▲ ***Un transformateur électrique** sur poteau ; **le transformateur électrique modifie la caractéristique de tension du courant sans changer la nature électrique de l'énergie transférée par cet appareil.***

Tableau I
Conversion d'énergie

Énergie d'arrivée / Énergie de départ	Mécanique	Électrique	Calorifique	Chimique	Rayonnante	Nucléaire
Mécanique		Tribo-électricité Piézo-électricité Dynamo Alternateur	Frottements Machines frigorifiques Pompes à chaleur	Réactions provoquées par compression	Triboluminescence	
Électrique	Moteurs électriques Pompes à métaux liquides		Effet Joule	Électrolyse	Électroluminescence	
Calorifique	Moteurs thermiques	Thermo-électricité		Réactions endothermiques (cracking)	Incandescence	
Chimique		Piles Accumulateurs Piles à combustible	Réactions exothermiques (combustion en particulier)		Chimio-luminescence	
Rayonnante	Radiomètre	Photo-électricité	Absorption	Photochimie – photosynthèse – photographie – photolyse		
Nucléaire			Fission et fusion nucléaires	Transformation des éléments radio-actifs	Radio-activité naturelle et artificielle	

Tableau I bis
Transformation d'énergie

Énergie d'arrivée / Énergie de départ	Mécanique	Électrique	Calorifique	Chimique	Rayonnante	Nucléaire
Mécanique	Leviers Vérins Engrenages Chaînes Courroies, etc.					
Électrique		Transformateurs Redresseurs				
Calorifique			Échangeurs Fours Condenseurs, etc.			
Chimique				Réactions chimiques en général		
Rayonnante					Laser	
Nucléaire						Convertisseurs Régénérateurs

▲ *Tableaux I et I bis permettant de faire la distinction entre la conversion et la transformation d'énergie. Noter dans le tableau I que l'énergie nucléaire, en raison de sa nature particulière, ne figure pas dans l'énergie d'arrivée.*

de quantité peuvent s'ajouter, le facteur de tension demeurant constant.

Soit par exemple : $d\varepsilon_1 = x dy_1$

$d\varepsilon_2 = x dy_2$

On peut écrire : $d\varepsilon = d\varepsilon_1 + d\varepsilon_2 = x\ (dy_1 + dy_2)$

et d'une façon plus générale : $d\varepsilon = \Sigma d\varepsilon_1 = x \Sigma dy$.

Il faut noter que les facteurs de tension des systèmes caractérisent l'aptitude de ces derniers à produire ou à transmettre de l'énergie. Les conversions ou transformations se font plus facilement avec des fluides à haute pression ou à haute température ou avec de fortes tensions électriques. Ces facteurs ne sont pas toujours connus en valeur absolue, mais on les détermine généralement par rapport à des niveaux arbitrairement choisis.

Terminons en disant que, comme pour les conversions, toutes les transformations ne sont pas possibles ; certaines en particulier sont irréversibles. Pour les transformations réalisables, il faut aussi toujours compter avec les pertes et il est donc important de préciser le rendement d'une transformation.

Tableau II Grandeurs extensives et intensives pour les trois formes d'énergie			
Formes d'énergie	**Grandeurs extensives (facteurs de tension ou de potentiel)**	**Grandeurs intensives (facteurs de quantité ou d'intensité)**	**Produit**
Mécanique			
Potentielle	*gh* (potentiel de gravitation)	M (masse)	= M*gh*
Élastique	*p* (pression)	V (volume)	= *p*V
Cinétique	1/2 *V* (vitesse)	M (masse)	= 1/2 M*V*
Travail	F (force) C (couple)	*x* (déplacement) (angle)	= F*x* = C*x*
Électrique	U (différence de potentiel)	*q* (quantité)	W = U*q*
Thermique	T (température absolue)	S (entropie)	Q = ST

◀ ***Tableau II :*** ***les grandeurs extensives et intensives pour les trois formes d'énergie (mécanique, électrique et thermique).***

Transformation de l'énergie thermique en énergie thermique

La transformation d'une énergie thermique en énergie thermique se limite au *transfert* d'énergie thermique avec *conservation* de l'énergie totale transférée. Le potentiel qui provoque la transformation de l'énergie thermique est la *température* et, si deux points matériels placés dans un milieu thermiquement isolé sont à la même température, on peut affirmer qu'il n'existe aucun échange thermique global entre ces deux points, dits en *équilibre thermique* (il s'agit bien d'un équilibre thermique, car chacun des points matériels émet une énergie thermique nette de même module mais de signe opposé).

Le transfert de chaleur au sein d'une phase ou plus généralement entre deux phases se fait de trois façons.

— **Par conduction :** le transport de chaleur correspond à la transmission d'une énergie cinétique due aux chocs élastiques des molécules des fluides, aux oscillations longitudinales des molécules des solides non conducteurs de l'électricité, ou aux mouvements des électrons dans les autres cas. Les lois fondamentales de transfert par conduction sont en complète analogie avec celles de la conduction électrique et des transports diffusionnels moléculaires de matière et de quantité de mouvement. Ainsi, le flux de chaleur transporté dans une direction donnée sera proportionnel au gradient de température dans cette direction.

— **Par convection :** ce transport ne se produit que dans le cas d'un fluide en mouvement et le transport de chaleur est dû au brassage de fractions de fluide ayant des températures différentes. Le mouvement du fluide peut être provoqué par une différence de pression totale (cas de convection forcée), ou par une différence de masse volumique, conséquence de l'existence, dans le milieu, de zones de fluide à températures différentes (cas de la convection naturelle ou libre).

— **Par rayonnement thermique :** tout corps (solide, liquide ou gazeux) porté à une température supérieure au zéro absolu rayonne dans toutes les directions une énergie thermique sous forme d'ondes électromagnétiques. Inversement, tout corps est susceptible d'absorber tout ou partie d'une énergie électromagnétique émise par lui-même ou par un corps situé dans son voisinage. Ce type de transport est analogue à la propagation de la lumière et il ne nécessite aucun support matériel, contrairement aux écoulements.

Dans de nombreux problèmes de transformation d'énergie thermique, les trois modes de transfert coexistent, mais généralement au moins une des trois formes pourra être négligée, ce qui simplifiera le traitement mathématique de l'appareil de transfert. Nous pouvons dire dès à présent qu'aux températures ordinaires le transport par rayonnement est négligeable, mais il peut devenir notable et prépondérant lorsque le niveau de température augmente.

En outre, certaines transformations thermiques sont accompagnées d'un *transfert de matière* entre deux phases. Le flux de chaleur transféré en présence d'un changement de phase dépend de la nature et des propriétés physico-chimiques des phases en présence. C'est le cas de l'ébullition, de la condensation, mais aussi des problèmes d'humidification, de séchage, de cristallisation, etc. Dans ces dernières opérations, les phases vapeur ou liquide ne sont pas pures, et elles contiennent en particulier un soluté présent seulement dans une des deux phases.

Dans une première partie, nous allons rappeler succinctement les lois générales et les principales corrélations permettant d'évaluer les débits de chaleur transférés en présence ou non d'un transfert de matière. Pour plus de détails, on pourra consulter les ouvrages généraux suivants :

— CARSLAW H.S., JAEGER J.C., *Conduction of Heat in Solids,* New York, Mac Milan, 1947.
— JAKOB M., *Heat Transfer,* t. I, II, J. Wiley and Sons, New York.
— Mac ADAMS W.H., *Transmission de la chaleur,* Dunod, Paris, 1964.
— PERRY R.H., CHILTON C.H., *Chemical Engineers' Handbook,* 5e édition, Mac Graw Hill Book Company, 1973.
— WUITHIER P., *Raffinage et Génie chimique,* pub. de l'Institut français du pétrole, t. I, II, Éd. Technip-Paris, 1972.

La deuxième partie sera consacrée à l'étude des principaux appareils de transformation d'énergie thermique en énergie thermique, le transfert pouvant être accompagné ou non d'un changement de phase.

Nous n'avons pas la prétention de présenter ici une revue complète et détaillée de tous les appareils de transformation thermique, mais, pour les quelques types d'appareils étudiés, nous indiquerons les principes de calcul, les différentes conceptions avec leurs caractéristiques et leurs contraintes.

Tableau III

Conductivité thermique λ des métaux à 0 °C (en W/m/°K)

Métaux	λ	Métaux	λ
Aluminium	202	Magnésium	154
Antimoine	18,6	Mercure	8,3
Argent	418	Molybdène	146
Béryllium	160	Nickel	58
Bismuth	8,3	Or	297
Cadmium	92	Plomb	35
Cuivre	389	Platine	71
Étain	67	Sodium	133
Fer	63	Tungstène	159
Lithium	71	Zinc	113

Tableau IV

Conductivité thermique λ des alliages (en W/m/°K)

Alliages	Température (en °C)	λ
Fonte	54	47,6
	102	46,4
Acier (1 % C)	18	45,2
Acier (13 % Cr, 0,2 % Ni)	500	29,0
Acier (18 % Cr, 8 % Ni)	500	21,5
Acier (23 % Cr, 11 % Ni)	500	18,6
Laiton (70 % Cu, 30 % Zn)	0	97,0
	100	103,9
Bronze marine	30	112,6
Constantan (60 % Cu, 40 % Ni)	18	22,6
	100	26,7
Manganin (84 % Cu, 4 % Ni, 12 % Mn)	18	22,2
	100	26,2

Tableau V

Conductivité thermique λ des isolants (en W/m/°K)

Isolants	Masse volumique (en kg/m³)	Température (en °C)	λ
Amiante (ciment)	1 970	30	0,389
Amiante (carton)	970	30	0,122
Amiante (laine)	400	100	0,100
Carbon black	190	56	0,021
Charbon de bois (poudre)	180	17	0,050
Ciment	2 280	25	1,82
Laine cardée	—	0	0,050
Coton cardé	80	38	0,060
Brique réfractaire	220 à 380	150	0,080
		540	0,128
Brique rouge	—	—	0,83
Liège en grains	90	— 5	0,049

Principales lois et corrélations en transfert de chaleur

Le transfert de chaleur par conduction

La loi de Fourier

Le flux de chaleur transféré par conduction dans une direction donnée est proportionnel au gradient de température dans cette direction. Ainsi, la composante sur l'axe O*x* du flux est telle que :

$$\varphi_x = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \qquad (1)$$

Dans cette loi, postulée dès 1822 par Fourier, le coefficient de proportionnalité λ est une caractéristique physico-chimique du point matériel désignée sous le nom de *conductivité* ou *conductibilité thermique*. Dans le système international, elle s'exprime en W/m/°K, et dans les *tableaux* III, IV, V, VI et VII sont reportées les conductivités de certains corps solides, liquides et gazeux.

La conductivité thermique diminue d'un facteur 10^3 à 10^4 lorsque l'on passe d'un métal à un gaz loin des conditions critiques. La conductivité thermique des liquides est une dizaine de fois supérieure à celle des gaz. Quant à celle des gaz purs et de leur mélange, elle peut être prévue avec une très bonne précision à partir de la théorie cinétique moderne des gaz. La conductivité thermique varie très légèrement avec la température mais il n'existe pas ou peu de règles générales permettant de prévoir le sens de variation.

Équation générale de transfert de chaleur par conduction

Un bilan de chaleur dans un élément de volume *dx dy dz* construit au point matériel M de coordonnées (*x*, *y*, *z*), en l'absence d'écoulement et de débit de travail mécanique, s'écrit en coordonnées cartésiennes sous la forme générale suivante :

$$\rho C_p \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z}\right) + q \qquad (2)$$

où t désigne la température au point M (*x*, *y*, *z*) et à l'instant τ ; λ, ρ et C_p représentent respectivement la conductivité thermique, la masse volumique et la capacité calorifique massique à pression constante du corps matériel au point M ; q est le débit de chaleur généré dans le volume élémentaire par réaction chimique, réaction nucléaire, énergie électrique, etc., rapporté à l'unité du du volume.

Selon la forme géométrique du milieu dans lequel le transport est étudié, on écrira l'équation **(2)** en coordonnées cylindriques ou sphériques. C'est l'équation **(2)** qu'il faudra résoudre pour trouver à chaque instant la distribution des températures et le flux transféré en tout point de l'enceinte.

Dans les ouvrages cités en référence, et plus spécialement pour les problèmes de conduction, on trouvera dans le Carslaw et Jaeger la solution de l'équation **(2)** en régime stationnaire et transitoire pour de nombreuses géométries courantes. Rappelons certains résultats élémentaires obtenus dans le cas de géométrie à une dimension principale.

* *Cas d'une plaque plane en régime stationnaire*

En régime stationnaire et en l'absence de source de chaleur interne, pour une plaque plane de très grande surface par rapport à son épaisseur, le flux de chaleur normal à la plaque est constant et égal à :

$$\varphi = \frac{\lambda_m}{x}(t_1 - t_2)$$

t_1 et t_2 désignent les températures des faces planes de la plaque, x l'épaisseur de la plaque, et λ_m la conductivité thermique moyenne du matériau constituant la plaque, soit :

$$\lambda_m = \frac{1}{t_2 - t_1}\int_{t_1}^{t_2} \lambda dt$$

Si la plaque n'est pas homogène mais constituée d'un empilement de n plaques d'épaisseur $x_1, x_2, ..., x_n$ et de conductivité $\lambda_1, \lambda_2, ..., \lambda_n$, le flux en un point quelconque de la plaque composite est constant et égal à :

$$\varphi = \frac{t_1 - t_2}{\frac{x_1}{\lambda_1}} = \frac{t_2 - t_3}{\frac{x_2}{\lambda_2}} = \dots =$$

$$(3) \qquad \frac{t_n - t_{n+1}}{\frac{x_n}{\lambda_n}} = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\sum_{i=1}^{n} \frac{x_i}{\lambda_i}}$$

Si $R_i = \frac{x_i}{\lambda_i}$ désigne la résistance thermique de la i-ième plaque, les relations **(3)** expriment que la résistance globale est la somme des résistances individuelles placées en série :

$$R_T = \sum_{i=1}^{n} R_i = \sum_{i=1}^{n} \frac{x_i}{\lambda_i}$$

avec $\varphi = \frac{t_1 - t_{n+1}}{R_T}$

* *Cas d'un cylindre creux, infiniment allongé, en régime stationnaire*

Soit un cylindre creux de rayon intérieur r_1, de rayon extérieur r_2, de très grande longueur par rapport à son épaisseur $e = r_2 - r_1$. En régime stationnaire et en l'absence d'une source de chaleur interne, le débit de chaleur par unité de longueur du cylindre, normalement à un tube cylindrique de rayon quelconque compris entre r_1 et r_2 est constant, soit :

$$\Phi' = -2\pi r \lambda \frac{dt}{dr} = C^{te}$$

d'où, par intégration entre r_1 et r_2 :

$$\Phi' = \frac{2\pi\lambda_m}{\text{Log}\,\frac{r_2}{r_1}} (t_1 - t_2)$$

Si l'épaisseur entre r_1 et r_2 n'est pas homogène mais constituée d'un empilement de n cylindres creux de rayons internes $r_1, r_2, ..., r_n$, le débit de chaleur par unité de longueur du cylindre est constant et égal à :

$$\Phi' = \frac{t_1 - t_2}{\text{Log}\,\frac{r_2}{r_1} \Big/ 2\pi\lambda_1} = \frac{t_2 - t_3}{\text{Log}\,\frac{r_3}{r_2} \Big/ 2\pi\lambda_2} = \dots =$$

$$\frac{t_n - t_{n+1}}{\text{Log}\,\frac{r_{n+1}}{r_n} \Big/ 2\pi\lambda_n} = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\sum_{i=1}^{n} \text{Log}\,\frac{r_{i+1}}{r_i} \Big/ 2\pi\lambda_i}$$

Ici encore, si $R_i = \frac{\text{Log}\,\frac{r_{i+1}}{r_i}}{2\pi\lambda_i}$ représente la résistance du

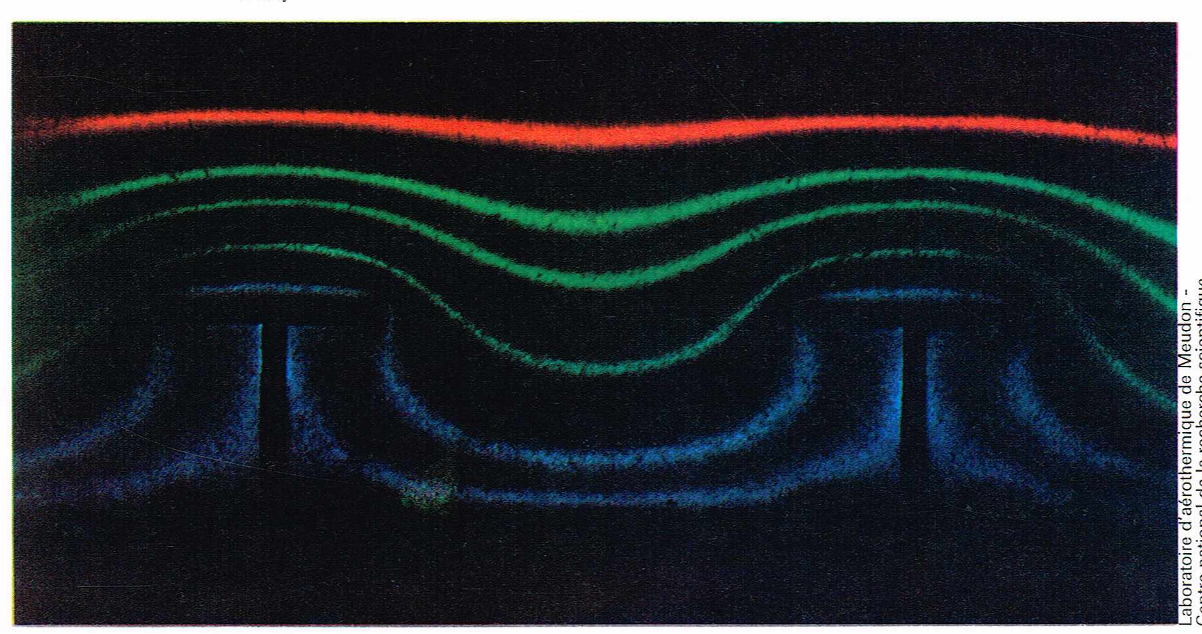
Tableau VI
Conductivité thermique λ des liquides (en W/m/°K)

Liquides	Température (en °C)	λ
Eau	0	0,578
Acide acétique	20	0,171
Acétone	30	0,176
Alcool éthylique	20	0,182
Aniline	0-20	0,173
Benzène	30	0,159
Chloroforme	30	0,138
Éthylène glycol	0	0,267
Essence	30	0,135
Pétrole	30	0,147
Toluène	30	0,149
Vaseline	15	0,183

Tableau VII
Conductivité thermique λ des gaz (en W/m/°K)

Gaz	Température (en °C)	λ
Air	0	0,024 1
	100	0,031 8
Gaz carbonique	0	0,014 5
	100	0,022 1
Oxygène	0	0,024 6
	100	0,032 5
Hydrogène	0	0,166
	100	0,215
Azote	0	0,024 0
	100	0,031 3
Méthane	0	0,030 3
Éthane	0	0,018 2
Éthylène	0	0,058 0
n Pentane	0	0,012 7
n Hexane	0	0,124
Vapeur d'eau	100	0,023 3
	200	0,029 9

◄▲ Page ci-contre et ci-dessus, tableaux III, IV, V, VI et VII : conductivité thermique de diverses substances pour les températures indiquées en référence.



Laboratoire d'aérothermique de Meudon - Centre national de la recherche scientifique

◄ Étude de la conduction en régime variable dans un mur complexe : visualisation d'isothermes par effet Christiansen dans des cellules d'essais thermiques contenant un milieu poreux.

i-ième cylindre creux, la résistance globale est la somme des résistances individuelles placées en série.

* *Problème de l'égalisation des températures par le contact*

Soit deux solides semi-infinis limités par une face plane ayant les températures initiales t_{10} et t_{20} et les propriétés physico-chimiques suivantes : conductivités thermiques : λ_1 et λ_2, capacités calorifiques massiques : C_{p1} et C_{p2} et masses volumiques ρ_1 et ρ_2.

Au temps $\tau = 0$, les deux solides étant mis en contact par la face plane, on veut connaître en particulier l'évolution et la valeur de la température de contact au cours du temps. Il s'agit de résoudre l'équation **(2)** pour deux milieux unidimensionnels illimités, en l'absence de source locale de chaleur.

Pour des milieux semi-infinis, la température de contact est indépendante du temps et égale à :

$$t_c = \frac{\beta_1 t_{10} + \beta_2 t_{20}}{\beta_1 + \beta_2} \quad \textbf{(4)}$$

où β représente la quantité :

$$\beta = \sqrt{\lambda \rho C_p}$$

Pour concrétiser l'intérêt de la relation **(4)**, évaluons par exemple la température s'établissant au contact de la main (dont nous assimilerons les propriétés à celles de l'eau) supposée à 25 °C avec un solide à 100 °C. Les résultats obtenus sont reportés dans le *tableau* VIII.

Alors que le cuivre provoque une brûlure, le bois ne donne qu'une sensation de chaleur. D'une manière générale, la température à la surface de séparation se rapproche de la température du solide pour lequel la valeur de β est la plus élevée.

▼ *Tableau VIII : constantes et températures de contact (t_c) de quelques substances. Figure 1 : distribution des températures observées entre un fluide chaud et un fluide froid séparés par une paroi métallique (dans le cas d'un transfert de chaleur par convection, en régime stationnaire).*

Le transfert de chaleur par convection

Définition des conductances partielles et globales de transfert par convection

Le transfert de chaleur par convection, dû au brassage de fractions de fluide à températures différentes, suppose donc la présence d'un écoulement. Ce mode de transport est donc exclu à l'intérieur des solides, mais il est prépondérant dans le cas des phases fluides s'écoulant nécessairement à l'intérieur et/ou à l'extérieur de surfaces solides. Ainsi, dans de nombreux problèmes industriels de transformation de chaleur, la chaleur est transmise d'une phase fluide à une autre phase fluide au travers d'une surface solide.

Imaginons un fluide chaud à la température t_1, s'écoulant d'un côté d'une paroi métallique, et un fluide froid à la température t_G s'écoulant de l'autre côté de la paroi d'épaisseur *x*. En régime stationnaire, les distributions de températures observées entre le fluide chaud et le fluide froid sont voisines de celles schématisées sur la *figure* 1.

L'étude des écoulements d'un fluide à l'intérieur ou à l'extérieur d'une conduite montre qu'il est toujours possible de répartir la distribution des vitesses du fluide en deux zones principales.

— Une première est située au voisinage de la paroi. Son épaisseur occupe toute la conduite si l'écoulement est laminaire ; elle décroît très rapidement lorsque l'écoulement devient de plus en plus turbulent. Dans cette région, le transport des trois extensités, matière, énergie et quantité de mouvement, se fait par diffusion moléculaire.

— Une deuxième est située au-delà de la première. Dans cette zone, le fluide est animé d'un mouvement tourbillonnant aléatoire entraînant très rapidement une égalisation de la vitesse, de la température et des compositions du fluide.

En écoulement turbulent, la première zone de très faible épaisseur porte généralement le nom de *couche limite*. Les gradients de température, de vitesse et de composition dans la couche sont très importants, ce qui signifie que la résistance principale au transfert est localisée dans la couche limite.

La distribution des températures dans la phase fluide peut s'obtenir en théorie par la résolution du bilan différentiel d'énergie (en supposant constantes les propriétés physico-chimiques du fluide), soit :

$$\rho C_p \left(\frac{\partial t}{\partial \tau} + u_x \frac{\partial t}{\partial x} + u_y \frac{\partial t}{\partial y} + u_z \frac{\partial t}{\partial z}\right) = \lambda_e \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}\right) + q + I_W \quad \textbf{(5)}$$

u_x, u_y, u_z représentent les composantes du vecteur vitesse $\vec{u}$, q est le débit de chaleur généré par unité de volume, I_W est le débit de travail perdu par unité de volume, conséquence de la nature visqueuse du fluide, et λ_e est la conductivité thermique apparente du fluide.

Pour résoudre **(5)**, il est donc nécessaire de connaître les valeurs locales et instantanées du vecteur vitesse et la valeur locale de la conductivité thermique. Il faut donc associer à l'équation précédente les équations traduisant les bilans différentiels de matière et de quantité de mouvement. La résolution simultanée de ce système d'équations n'est envisageable que dans des cas simples de géométries et d'écoulement, et principalement pour l'écoulement laminaire. Pour un écoulement turbulent, des hypothèses simplificatrices et des approximations sur les distributions de vitesse doivent être faites pour obtenir une expression théorique donnant la distribution des températures et le flux transféré à la paroi.

Par suite de ces difficultés dans le cas de l'écoulement turbulent et de l'impossibilité de mesurer les épaisseurs de couche limite ainsi que les températures aux extrémités, on définit le flux de chaleur transféré à la paroi de manière purement phénoménologique en posant :

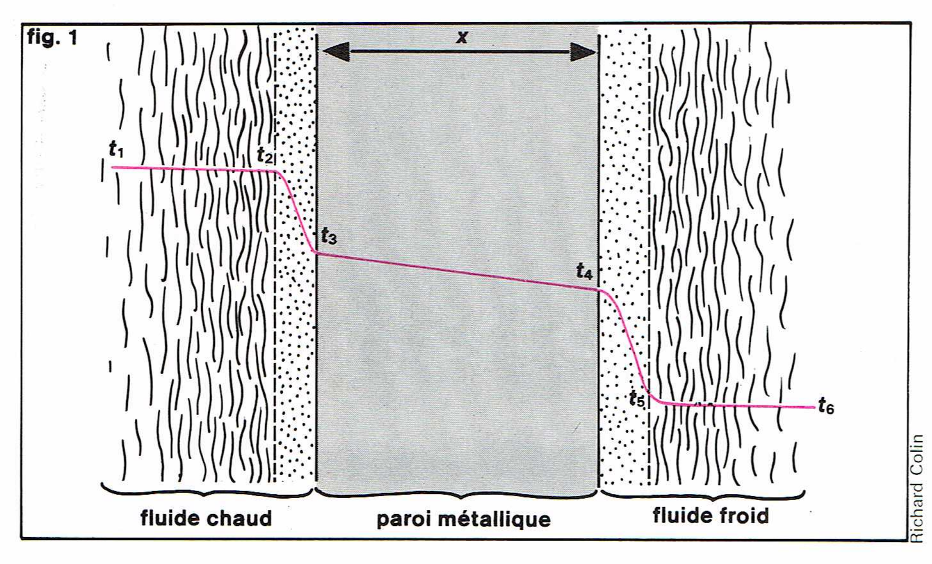
$$d\Phi = h_i dS_i\,(t_1 - t_3) = h_e dS_e\,(t_4 - t_6) \quad \textbf{(6)}$$

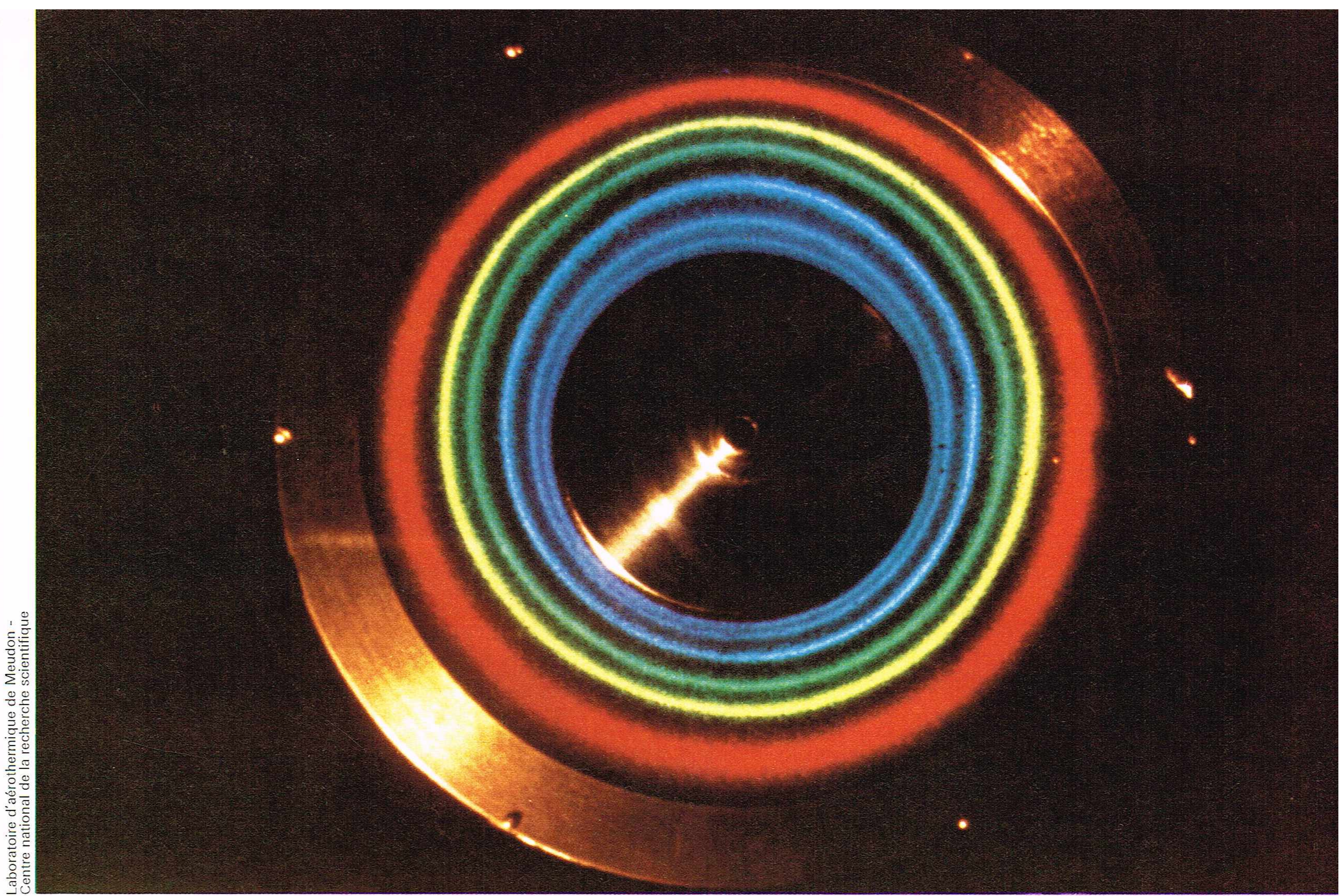
Les deux coefficients h_i et h_e représentent les coefficients de transfert (ou conductance partielle de transfert) interne et externe. La définition des coefficients h_i et h_e est arbitraire puisque leur valeur dépend du choix de la force motrice.

En outre, le débit transféré dans une phase entre l'entrée et la sortie peut être défini de diverses manières et l'usage courant est d'utiliser soit une moyenne arithmétique, soit une moyenne logarithmique de la différence des températures Δt du fluide loin de la paroi et du fluide au voisinage de la paroi. Si Φ désigne le flux transféré entre l'entrée et la sortie, on écrira que ce débit est tel que :

Tableau VIII
Constantes et températures de contact (t_c) de quelques substances

Corps	λ (en W/m/°C)	C_p (en J/kg/°C)	ρ (en kg/m³)	β	t_c (en °C)
Cuivre	389	382	8 950	36 186	96,9
Verre	0,81	836	2 500	1 301	59,1
Eau	0,58	4 180	1 000	1 557	62,5
Bois	0,18	2 383	670	536	44,2





Laboratoire d'aérothermique de Meudon - Centre national de la recherche scientifique

▲ *Déformation des isothermes due à la convection naturelle (convection libre) dans une cellule simulant une conduite horizontale chauffée, entourée par une gaine isolante en fibres de verre.*

$$\Phi = h_{ma}\ (\Delta t)_{ma}$$

$$\text{où} \quad (\Delta t)_{ma} = \frac{(\Delta t)_{sortie} - (\Delta t)_{entrée}}{2}$$

$$\Phi = h_{ml}\ (\Delta t)_{ml}$$

$$\text{où} \quad (\Delta t)_{ml} = \frac{(\Delta t)_{sortie} - (\Delta t)_{entrée}}{\text{Log}\ \dfrac{(\Delta t)_{sortie}}{(\Delta t)_{entrée}}}$$

Les coefficients de transfert h_{ma} et h_{ml} sont des coefficients globaux fondés sur la moyenne arithmétique ou la moyenne logarithmique des différences de températures. Ils sont en général différents et, dans de nombreux appareils de transfert, les coefficients de transferts partiels définis par la relation **(6)** sont voisins du coefficient global h_{ml}.

Pour évaluer les coefficients partiels et globaux, introduits précédemment à partir de la connaissance des débits transférés, il est nécessaire de connaître la température du fluide à la surface du solide, température délicate à mesurer. Aussi préfère-t-on définir le débit transféré par rapport à une différence de température plus facilement accessible, par exemple celle entre les températures du noyau turbulent du fluide intérieur et extérieur, soit :

$$d\Phi = \text{U}d\text{S}_m\ (t_1 - t_6)$$

Le coefficient U représente une conductance globale de transfert et S_m désigne une valeur moyenne de la surface solide de séparation.

En régime stationnaire, le débit élémentaire transféré est tel que :

$$d\Phi = \frac{d\text{S}_m\ (t_1 - t_6)}{\dfrac{1}{\text{U}}} = \frac{(t_1 - t_6)}{\dfrac{1}{h_i d\text{S}_i} + \dfrac{x}{\lambda d\text{S}_m} + \dfrac{1}{h_e d\text{S}_e}}$$

La résistance globale locale est la somme de trois résistances partielles placées en série.

Représentation des conductances de transfert

L'analyse des critères adimensionnels fait apparaître deux critères contenant le coefficient de transfert convectif.

★ *Le critère de Margoulis (ou de Stanton)*

Il représente l'efficacité locale du transport transversal par rapport au transport longitudinal. Il est tel que :

$$\mathcal{M}\text{S}_t = \frac{h}{\rho_m\ \text{C}_{pm}\ \text{U}_m}$$

On relie ce critère d'une part au *critère de Prandtl* :

$$\mathcal{P}r = \frac{\nu}{\alpha}$$

où ν et α désignent respectivement les diffusivités de quantité de mouvement (ou viscosité cinématique) et thermique, et d'autre part au *critère de Reynolds* :

$$\mathcal{R}e = \frac{\rho_m\ \text{U}_m\ d}{\mu_m}$$

où μ_m est la viscosité moyenne du fluide et d une longueur caractéristique de l'enceinte dans laquelle s'effectue le transfert.

Le *critère de Prandtl* est caractéristique des propriétés physico-chimiques diffusionnelles du fluide, et le critère de Reynolds est caractéristique de la nature de l'écoulement.

D'autres critères peuvent intervenir également :

— Le rapport $\frac{\text{L}}{d}$ où L est la longueur d'une conduite cylindrique de diamètre d. Ce rapport permet de tenir compte des perturbations dues aux extrémités de la conduite.

— Le rapport $\left(\frac{\mu_m}{\mu_p}\right)^{0,14}$ où μ_p est la viscosité du fluide à la température de la paroi. Ce rapport permet de tenir compte des variations de viscosité en fonction de la température (variation importante dans le cas des liquides).

A l'exception des gaz sous faible pression, pour lesquels l'analogie entre les trois transferts, de matière, de chaleur et de quantité de mouvement est sensiblement réalisée, Colburn a montré expérimentalement qu'un meilleur accord était observé dans tous les cas entre les trois transports en considérant les trois critères adimensionnels suivants :

— Pour la matière $j_m = \mathcal{M}\text{S}_m\ (\mathcal{S}c)^{2/3}$

$\mathcal{M}\text{S}_m$ représente le *critère de Margoulis* pour la matière

$$\mathcal{M}\text{S}_m = \frac{k_\text{D}}{u_m}$$

où k_D est la conductance globale de transfert de matière ;

$\mathcal{S}c$ représente le *critère de Schmidt;* il est tel que $\mathcal{S}c = \frac{\nu}{D}$

où D est la diffusivité du soluté transféré dans la phase fluide.

— Pour la chaleur $j_t = \mathcal{M}S_t\ (\mathcal{P}r)^{2/3}$

— Pour la quantité de mouvement :

$$\frac{f}{2} = \frac{\tau_s}{\rho u_m^2}$$

où τ_s est la contrainte de frottement sur la paroi, due à la nature visqueuse du fluide.

Le critère $f/2$ ou facteur de frottement n'est rien d'autre que le critère de Margoulis relatif au transfert de quantité de mouvement.

Les critères j_m, j_t et $f/2$ sont tels que :

(7) $$j_m = j_t = f/2$$

La relation **(7)** proposée par Colburn (*Trans. Am. Inst. Chem. Engrs*, 29, 174 [1933]) est assez bien vérifiée expérimentalement. Aussi utilise-t-on indifféremment pour le transfert de chaleur convectif les critères $\mathcal{M}S_t$ ou j_t.

★ *Le critère de Nusselt*

Il représente le rapport d'une dimension géométrique de l'appareil à l'épaisseur de la couche limite dans le modèle à deux zones. Il est tel que :

$$\mathcal{N}u = \frac{hd}{\lambda}$$

Bien que le critère de Margoulis ou le facteur j_t soient directement accessibles par l'expérience, le critère de Nusselt est plus usuel pour représenter les variations du coefficient de transfert en fonction des grandeurs intervenant dans les nombres adimensionnels :

$$\mathcal{R}e,\ \mathcal{P}r,\ \frac{L}{d},\ \left(\frac{\mu_m}{\mu_p}\right)^{0,14}$$

Nous allons dans ce qui suit donner quelques-unes des corrélations permettant d'avoir un ordre de grandeur du coefficient de transfert. En effet, dans de nombreux cas, il ne s'agira que d'un ordre de grandeur, la dispersion des résultats expérimentaux étant de l'ordre de 30 à 50 % par suite de l'influence de certains paramètres difficilement contrôlables tels que l'état de surface des supports solides par exemple.

Convection forcée

★ *A l'intérieur de la conduite*

● *Écoulement laminaire*

Les écoulements laminaires ont été étudiés théoriquement de manière détaillée pour de nombreuses géométries et différentes conditions aux limites. Cependant l'écoulement laminaire idéal est très rare et, en particulier, la convection naturelle est très souvent présente et l'hypothèse d'un transport transversal de la chaleur uniquement par conduction moléculaire n'est pas correcte. Aussi, des relations plus empiriques conduisent souvent à des résultats plus voisins des valeurs expérimentales.

▼ Tableau IX : valeurs limites du critère $(\mathcal{N}u)_{ml}$ pour différentes formes de conduites fermées.

Tableau IX
Valeurs limites du critère $(\mathcal{N}u)_{ml}$ pour différentes formes de conduites fermées

Section de la conduite	Valeur limite de $(\mathcal{N}u)_{ml}$	
	à température constante	à flux constant
Cercle	3,66	4,36
Triangle équilatéral	—	3,00
Carré $\left(\frac{a}{b} = 1\right)$	2,89	3,63
Rectangle $\left(\frac{a}{b} = 0,5\right)$	3,39	4,11
Plans parallèles illimités $\left(\frac{a}{b} \to 0\right)$	7,60	8,24

Le coefficient de transfert moyen (moyenne logarithmique ou arithmétique) est généralement introduit dans un critère de Nusselt ne dépendant dans de nombreux cas que du *critère de Gruetz* tel que :

$$\mathcal{G}z = \mathcal{R}e\mathcal{P}r\frac{d}{L}$$

Dans certains cas, on tient compte de la convection naturelle en introduisant, comme nous le verrons plus loin, le *critère de Graetz.*

Les études théoriques montrent que, pour des tubes très longs, le critère $(\mathcal{N}u)_{ml}$ tend vers une valeur limite. Dans le *tableau* IX, on a reporté ces valeurs limites pour différentes formes de conduites cylindriques fermées et pour les deux hypothèses classiques postulées à la paroi : température de la paroi constante, et flux de chaleur transféré à la paroi constant.

Parmi les relations expérimentales proposées, pour des tubes cylindriques circulaires de longueurs finies, on pourra utiliser :

— la *relation de Hausen* (*Z. Ver. Deut. Beih. Verfahrenstech.* n° 4, 91 [1943]) valable pour $\mathcal{G}z < 100$, soit :

(8) $$(\mathcal{N}u)_{ml} = 3,66 + \frac{0,085\ \mathcal{G}z}{1 + 0,047\ (\mathcal{G}z)^{2/3}} \left(\frac{\mu_m}{\mu_p}\right)^{0,14}$$

— la *relation de Sieder et Tate* (*Ind. Eng. Chem.*, 28, 1429 [1936]) valable pour $\mathcal{G}z > 100$, soit :

(9) $$(\mathcal{N}u)_{ma} = 1,86\ (\mathcal{G}z)^{1/3} \left(\frac{\mu_m}{\mu_p}\right)^{0,14}$$

Pour des conduites fermées non circulaires, différentes relations ont été proposées pour chacune des géométries particulières, mais, comme le précisent Kays et London (*Compact Heat Exchangers*, 2e ed. Mac Graw Hill, New York [1964]), on peut utiliser les relations **(8)** et **(9)** à condition toutefois de remplacer le diamètre introduit dans les critères par un diamètre d_e défini par la relation :

$$d_e = 4\,\frac{\text{volume du fluide}}{\text{surface solide mouillée par le fluide}} = 4\,d_H$$

où d_H est le diamètre hydraulique de la conduite.

● *Écoulement intermédiaire*

Entre la limite supérieure de l'écoulement laminaire ($\mathcal{R}e = 2\,100$) et la limite inférieure de l'écoulement turbulent ($\mathcal{R}e = 5\,000$) se situe le domaine où l'écoulement est dit intermédiaire. Il n'existe pas de relation unique permettant de représenter avec précision ce domaine.

Lorsque $L/d > 60$, la relation proposée par Hausen (*Z. Ver. Deut. Ing. Beih. Verfahrenstech.* n° 4, 91, [1934]) représente bien les résultats aux extrémités de la zone intermédiaire, soit :

$$(\mathcal{N}u)_{ma} = 0,116\ (\mathcal{R}e^{2/3} - 125)\ \mathcal{P}r^{1/3} \left[1 + \left(\frac{d}{L}\right)^{2/3}\right] \left[\frac{\mu_m}{\mu_p}\right]^{0,14}$$

● *Écoulement turbulent*

A partir de modèles fondés sur la distribution des vitesses en régime turbulent à l'intérieur des conduites cylindriques circulaires et en tenant compte des analogies entre transfert de chaleur et de quantité de mouvement, on aboutit aux relations dites *relations de Prandtl-Taylor et de von Karman.* Ces relations sont trop complexes et pas plus précises que certaines relations empiriques.

Ainsi pour $\mathcal{R}e > 10^4$, $0,7 < \mathcal{P}r < 700$, $\frac{L}{d} > 60$, les propriétés physico-chimiques du fluide étant évaluées à la température moyenne du fluide, on pourra employer la relation dite *relation de Sieder et Tate*, soit :

$$\mathcal{N}u = 0,023\ \mathcal{R}e^{0,8}\ (\mathcal{P}r)^{1/3} \left(\frac{\mu_m}{\mu_p}\right)^{0,14}$$

qui s'écrit en fonction du critère de Colburn j_t :

(10) $$j_t = \mathcal{M}S_t\ (\mathcal{P}r)^{2/3} \left(\frac{\mu_m}{\mu_p}\right)^{0,14} = 0,023\ (\mathcal{R}e)^{0,8} \# \frac{f}{2}$$

Dans l'équation **(10)**, le facteur tenant compte de la variation de la viscosité en fonction de la température peut être supprimé si les propriétés physico-chimiques du fluide sont évaluées à la température de film :

$$t_f = \frac{t_m + t_p}{2}$$

Les relations précédentes ne sont valables que dans le cas de tubes lisses. Pour des tubes rugueux, par suite de l'analogie de Colburn, il suffira de remplacer dans la relation **(10)** le terme 0,023 $\mathcal{R}e^{0,8}$ par la valeur du facteur de frottement relatif aux tubes rugueux, soit :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 4{,}06 \log \frac{d}{2\,e} + 3{,}36$$

où e est la hauteur moyenne des protubérances.

Dans le cas de l'air et de l'eau, il existe des relations donnant directement le coefficient de transfert.

Comme dans le cas de l'écoulement laminaire et intermédiaire, il est possible en écoulement turbulent de tenir compte des effets dus aux extrémités. Le coefficient de transfert pour une conduite de longueur L est lié au coefficient de transfert évalué à l'aide des relations précédentes (soit h_{∞}) par une loi du type :

$$\frac{h\mathrm{L}}{h_{\infty}} = 1 + \mathrm{F}\frac{d}{\mathrm{L}}$$

Des valeurs du coefficient F ont été précisées par Kays (*Convective Heat and Mass Transfer*, Mc Graw Hill, New York [1964]), Knudsen et Katz (*Fluid Dynamic and Heat Transfer*, Mc Graw Hill, New York [1958]).

Les valeurs suivantes peuvent être utilisées :

— profil de vitesse totalement établi : F = 1,4

— rétrécissement brusque à l'entrée : F = 6

— coude à 90° : F = 7

— courbure à 180° : F = 6.

Pour des espaces annulaires concentriques, on peut définir des coefficients différents pour chacune des parois, mais, comme le précise Mac Adams (*Transmission de la chaleur*, Dunod, Paris [1964]), on peut prendre une valeur unique pour les deux coefficients à condition d'évaluer cette valeur à l'aide de la relation de Sieder et Tate dans laquelle on a remplacé le diamètre de la conduite par le diamètre équivalent. Cette procédure pourra également s'appliquer au cas des conduites cylindriques non circulaires.

* *A l'extérieur d'obstacles solides*

● *Tube isolé perpendiculaire à l'écoulement*

Pour des tubes cylindriques à 100 °C, de diamètre compris entre 0,3 et 15 cm, Hilpert (*Forschung and d. Geb. d. Ingenieurwes.* n° 4, 125, [1933]) a étudié le transfert de chaleur avec de l'air dont la température variait de 19 à 24 °C. L'ensemble des résultats expérimentaux peut être représenté par une équation de la forme :

$$\mathcal{N}u = \frac{h_m d_0}{\lambda} = a\left(\frac{\rho u d_0}{\mu}\right)^n$$

d_0 est le diamètre de la conduite cylindrique. Les valeurs de a et n à utiliser sont reportées dans le *tableau* X.

D'autres relations ont été proposées pour des domaines plus étendus en critères de Reynolds. L'équation précédente établie pour l'air reste valable pour les gaz diatomiques.

Pour les liquides, il est nécessaire de faire intervenir le critère de Prandtl. Ulsamer (*Forschung and d. Geb. d. Ingenieurwes.*, n° 3, 94 [1932]) propose une relation du type :

$$\mathcal{N}u = a\left(\frac{\rho u d_0}{\mu}\right)^n (\mathcal{P}r)^{0,3}$$

Les valeurs de a et n à utiliser sont reportées dans le *tableau* XI.

● *Faisceau de tubes*

Les tubes peuvent être disposés dans une direction normale à l'écoulement soit dans un même plan, soit en quinconce. Il est difficile de préciser la nature de l'écoulement car la section offerte au passage du fluide varie constamment. Certains auteurs définissent un critère de Reynolds avec la vitesse du fluide entre deux tubes. Aucune équation n'est applicable directement aux échangeurs industriels. Dans le cas de rangées de tubes en quinconce, Colburn (*Trans. Am. Inst. Chem. Engrs.* 29, 174 [1933]) recommande la relation :

$$\frac{h_m d_0}{\lambda} = 0{,}33\ (\mathcal{P}r)^{1/3}\left(\frac{\rho u_{\max}\, d_0}{\mu}\right)^{0,6}$$

Tableau X
Coefficients à utiliser dans le cas de la convection forcée entre l'air et l'extérieur d'un tube isolé perpendiculaire à l'écoulement

$\frac{\rho u\, d_0}{\mu}$	n	a	$\frac{h_m\, d_0}{\lambda}$
1-4	0,330	0,891	0,891 - 1,42
4-40	0,385	0,821	1,40 - 3,40
40-4 000	0,466	0,615	3,43 - 29,6
4 000-40 000	0,618	0,174	29,5 -121
40 000-200 000	0,805	0,023 9	121 -528

Tableau XI
Coefficients à utiliser dans le cas de la convection forcée entre un liquide et l'extérieur d'un tube isolé perpendiculaire à l'écoulement

$\frac{\rho u\, d_0}{\mu}$	n	a
0,1-50	0,385	0,91
50-10 000	0,500	0,60

▲ Tableau X : valeurs des différents coefficients à utiliser dans le cas de la convection forcée entre l'air et l'extérieur d'un tube isolé perpendiculaire à l'écoulement.
Tableau XI : valeurs des différents coefficients à utiliser dans le cas de la convection forcée entre un liquide et l'extérieur d'un tube isolé perpendiculaire à l'écoulement.

$u_{\max}$ représente la vitesse du fluide dans la section minimale rencontrée. Cette équation est valable pour des critères de Reynolds $\frac{\rho u_{\max}\, d_0}{\mu}$ compris entre 2 000 et 32 000 et pour des rangées de tubes alignés, Colburn a suggéré de ramener la constante 0,33 de l'équation précédente à 0,26.

Lorsque le nombre de rangées de tubes augmente, le coefficient de transfert augmente puis atteint une valeur asymptotique d'ailleurs indépendante de la forme géométrique, dès que le nombre de rangées est supérieur à 10.

● *A travers des lits à structure granulaire*

Les coefficients de transfert de chaleur au niveau d'une particule sphérique isolée peuvent être prévus théoriquement ; on trouve :

$$\mathcal{N}u = 2$$

Cette relation n'est valable que dans le cas où le diamètre de la particule est très supérieur au libre parcours moyen des molécules du fluide. En présence de convection libre (exemple des évaporations), Ranz et Marshall ont établi la relation :

$$\mathcal{N}u = 2{,}0 + 0{,}6\ (\mathcal{P}r)^{1/3}\ (\mathcal{G}r)^{1/4}$$

où $\mathcal{G}r$ est le critère de Grashof dont l'expression sera explicitée plus loin.

Lorsque le critère de Grashof devient négligeable devant le critère de Reynolds, les différentes relations proposées sont telles qu'aux faibles valeurs du critère de Reynolds, le critère de Nusselt doit prendre des valeurs voisines de 2. Cela n'est vérifié que pour des particules de diamètre supérieur à 1 mm. Parmi les relations, nous citerons celles de Boussinesq :

$$\mathcal{N}u = 1{,}23\ \ \mathcal{R}e^{0,5}\ (\mathcal{P}r)^{1/2} \quad \text{valable pour } \mathcal{R}e > 100$$

et de Pigford :

$$\mathcal{N}u = 0{,}714\ \mathcal{R}e^{0,5}\ (\mathcal{P}r)^{1/2} \quad \text{valable pour } \mathcal{R}e > 500.$$

Les deux relations précédentes donnent un ordre de grandeur du domaine d'incertitude des déterminations expérimentales des coefficients de transfert.

Dans le cas des lits fixes, l'indétermination sur les coefficients de transfert est encore plus importante et les résultats expérimentaux sont traduits généralement sous forme de courbes. Les coefficients de transfert en lit fixe sont supérieurs pour un même critère de Reynolds à ceux de la particule isolée.

Certains auteurs tiennent compte des effets dus à la paroi au voisinage de laquelle la porosité du lit est plus grande. On admet que les effets de paroi sont négligeables lorsque le rapport dt/dp est supérieur à 18 ; dt et dp désignent respectivement le diamètre de la conduite et le

diamètre de la particule. Ainsi Baumester et Bennett (*A.I. ch. E Journal*, 4, 69 [1958]) proposent les relations :

$$\text{pour } \frac{dt}{dp} < 18 \quad \mathcal{N}u = 1{,}09\ \mathcal{R}e^{0,68}\ (\mathcal{P}r)^{1/3}$$

$$\text{pour } \frac{dt}{dp} > 18 \quad \mathcal{N}u = 0{,}92\ \mathcal{R}e^{0,72}\ (\mathcal{P}r)^{1/3}$$

Une valeur moyenne du critère de Nusselt préconisée par Kunii et Levenspiel (*Fluidization Engineering*, John Wiley and Sons, New York [1969]), pour $\mathcal{R}e > 100$ et $dp < 1$ mm, s'écrit :

$$\mathcal{N}u = 2{,}0 + 1{,}8\ (\mathcal{R}e)^{0,5}\ (\mathcal{P}r)^{1/3}$$

Lorsque le diamètre des particules devient inférieur à 1 mm, on obtient expérimentalement des critères de Nusselt inférieurs à la valeur limite 2. Ceci a pu être expliqué de manière qualitative et même quantitative mais les difficultés rencontrées lors des mesures expérimentales ne permettent pas de justifier totalement les hypothèses faites pour rendre compte de ces effets.

En ce qui concerne le transfert de chaleur à la paroi, de nombreuses relations ont été proposées. Pendant longtemps, on a utilisé des relations du type de celles proposées par Leva (*Chem. Eng. Progr*, 45, 563 [1943], *Ind. Eng. Chem.*, 40, 747 [1948]), soit :

réacteur réchauffé :

$$\frac{hdt}{\lambda} = 0{,}813\ \text{exp.}\left(-\frac{6\ dp}{dt}\right)\left(\frac{\rho u dp}{\mu}\right)^{0,9}$$

réacteur refroidi :

$$\frac{hdt}{\lambda} = 3{,}50\ \text{exp.}\left(-\frac{4{,}6\ dp}{dt}\right)\left(\frac{\rho u dp}{\mu}\right)^{0,7}$$

Ces corrélations se révèlent suffisantes dans le cas où le débit de chaleur produit au sein du lit est nul ou faible. En revanche, en présence de réactions fortement exo- ou endothermiques, le transfert de chaleur dans le lit doit être caractérisé par deux paramètres :

— une conductivité apparente λ_e ;

— un coefficient de transfert convectif au voisinage de la paroi, α_w. Pour chacune de ces grandeurs, on distingue d'une part une contribution statique et d'autre part une contribution dynamique. Les contributions statiques peuvent être estimées à partir de modèles de transport proposés initialement par Kunii et Smith. Des relations donnant les contributions dynamiques ont été établies par Froment pour un écoulement d'air, le critère de Reynolds variant de 30 à 10 000, soit :

$$\lambda_{eD} = \frac{0{,}002\,5}{1 + 46\left(\dfrac{dp}{dt}\right)^2}\mathcal{R}e$$

$$\alpha_{wD} = \frac{0{,}011\,5\ dt}{dp}\mathcal{R}e$$

Dans le cas d'un réacteur cylindrique circulaire, le coefficient de transfert h estimé à partir des relations de Léva est lié aux grandeurs λ_e et α_w par la relation :

$$\frac{1}{h} = \frac{1}{\alpha_w} + \frac{dt}{8\ \lambda_e}$$

En lit fluidisé, on pourrait penser que la valeur du coefficient de transfert doit rester comprise entre celles du lit fixe et de la particule isolée. Cela n'est observé expérimentalement que pour de très grosses particules et des critères de Reynolds supérieurs à 100. En réalité, les particules utilisées dans les lits fluides ont des diamètres moyens inférieurs à 1 mm et, pour un même critère de Reynolds, la valeur du coefficient de transfert en lit fluide est sensiblement 3 fois plus petite que celle en lit fixe. Pour des critères de Reynolds inférieurs à 100, de nombreux résultats expérimentaux peuvent être interprétés par la relation :

$$\mathcal{N}u = 0{,}3\ \mathcal{R}e^{1/3}$$

Quant au coefficient de transfert de chaleur entre le lit fluide et la paroi du lit ou une paroi intérieure au lit, il est d'une manière générale 20 à 40 fois plus grand que le coefficient de transfert entre la phase fluide et la particule. De nombreuses corrélations ont été proposées pour évaluer ces coefficients de transfert. Les principales sont rappelées dans l'ouvrage de Kunii et Levenspiel indiqué précédemment.

Convection libre

Le transport de chaleur dû à l'existence du gradient de température est couplé à un transport de matière provoqué par la différence de masse volumique.

Dans le cas d'une paroi plane verticale de hauteur L, à la température t_p baignée dans un fluide au repos à la température t_1, le flux de chaleur transféré entre le fluide et la paroi est proportionnel à la différence de température $t_p - t_1$. Le coefficient de transfert peut être obtenu de manière rigoureuse si l'écoulement du fluide au voisinage de la paroi est laminaire. La résolution a été proposée initialement par Pohlhausen (*Zeitschrift fur angew. Math und. Mech.* 1, 115 [1921]), Schmidt et Beckmann (*Techn. Mech. and Termodynamik* 1, 341, 391 [1930]) ; Le coefficient de transfert est tel que :

$$\textbf{(11)}\quad h_m = 0{,}518\,\frac{\lambda}{L}\left(\frac{\beta g\ (t_p - t_1)\ \rho^2 L^3}{\mu^2}\right)^{1/4}\left(\frac{\mu C_p}{\lambda}\right)^{1/4}$$

où β est le coefficient de dilatation volumique du fluide :

$$\beta = -\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right) = \frac{1}{v}\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)$$

v représentant le volume molaire.

En introduisant le critère adimensionnel dit de Grashof, soit :

$$\mathcal{G}r = \frac{\beta g\ (t_p - t_1)\ \rho^2 L^3}{\mu^2}$$

la relation **(11)** s'écrit sous forme adimensionnelle :

$$\textbf{(12)}\quad \mathcal{N}u_L = 0{,}518\ (\mathcal{G}r_L \mathcal{P}r)^{1/4}$$

Lorsque la hauteur de la plaque est suffisante, et plus précisément lorsque le critère de Grashof atteint certaines

Tableau XII
Coefficient *a* pour quelques géométries usuelles dans le cas de la convection libre

Surface	Dimension caractéristique	Coefficient *a* — Régime laminaire	Coefficient *a* — Régime turbulent
Plan ou cylindre vertical *	hauteur	0,56	0,12
Cylindre horizontal	diamètre	0,47	0,12
Plan horizontal face supérieure	largeur	0,57	0,14
Plan horizontal face inférieure	largeur	0,25	—

* Le cylindre vertical conduit au même résultat que le plan vertical à condition que son diamètre soit très supérieur à l'épaisseur de la couche de fluide en mouvement.

▶ ***Tableau XII* : valeur du coefficient *a* pour quelques géométries usuelles dans le cas de la convection libre.**



Centre de recherches sur les très basses températures - Centre national de la recherche scientifique

▲ ***Exemple d'appareil réalisant des échanges par convection avec changement de phase, le liquéfacteur mixte à hélium et à hydrogène fonctionne automatiquement avec un débit de 6,5 litres d'hélium liquide par heure.***

valeurs, les filets de fluide en écoulement au voisinage de la plaque ne restent plus parallèles à la surface plane ; il apparaît de la turbulence. La relation **(12)** n'est plus valable, mais de manière générale le coefficient global de transfert reste donné par des relations du type :

$$\mathcal{N}u_L = a\,(\mathcal{G}r_L\mathcal{P}r)^n$$

Le coefficient *a* dépend de la géométrie, de l'orientation et du régime d'écoulement, alors que l'exposant *n* ne dépend que du régime d'écoulement. La transition entre les régimes d'écoulement laminaire et turbulent se produit pour des valeurs du produit $\mathcal{G}r\mathcal{P}r$ voisines de 10^9.

L'exposant *n* vaut 0,25 en écoulement laminaire et 0,33 en écoulement turbulent. Des valeurs du coefficient *a*, pour quelques géométries usuelles, sont reportées dans le *tableau* XII.

Convection avec changement de phase

** La condensation*

La condensation se produit lorsqu'une vapeur saturée se trouve au contact d'une surface à une température inférieure ou égale à la température de saturation. La condensation peut présenter alors deux aspects.

— La formation de gouttelettes qui ruissellent sans couler le long de la paroi. Ce type de condensation a été observé pour la vapeur d'eau ou des vapeurs immiscibles, en présence de surfaces métalliques propres, polies ou convenablement traitées. Dès que l'état de la surface présente des irrégularités, la condensation en gouttes disparaît. On aboutit au second aspect, soit :

— La formation d'un film continu de vapeur condensée s'écoulant le long de la paroi. C'est le cas le plus fréquent, et bien que la condensation en gouttes conduise à des débits de chaleur transférés 6 à 8 fois plus grands que la condensation en film, tous les condenseurs industriels sont évalués avec l'hypothèse d'une condensation en film.

Seul ce type de condensation a été étudié théoriquement. La première théorie, due à Nusselt, date de 1916 (*Z. Ver. Deut. Ing.*, 60, 541 [1916]).

Soit une plaque verticale à la température t_p sur laquelle se condense en film une vapeur saturée à la température t_v. Γ désignant le débit massique de liquide condensé par unité de périmètre de film, on introduit un critère de Reynolds défini de la manière suivante :

$$\mathcal{R}e = \frac{4\,\Gamma}{\mu}$$

Pour $\mathcal{R}e < 2\,100$, l'épaisseur du film de liquide condensé vaut $\left(\frac{3\,\mu\Gamma}{\rho^2 g}\right)^{1/3}$ et le coefficient de transfert moyen, pour une surface verticale de hauteur L, est tel que :

$$\mathcal{N}u_L = \frac{hL}{\lambda} = 0{,}943\left(\frac{\Lambda\rho^2 g L^3}{\lambda\mu\,(t_p - t_v)}\right)^{1/4} = 0{,}925\left(\frac{\rho^2 g L^3}{\mu\Gamma}\right)^{1/3}$$

Λ est la chaleur latente massique de vaporisation à la température de la paroi. Les caractéristiques physico-chimiques du film liquide doivent être évaluées à la température du film, soit $\frac{t_p + t_v}{2}$.

La relation précédente reste également valable pour un tube cylindrique vertical à condition que le diamètre du cylindre soit grand devant l'épaisseur du film.

Dans le cas d'une conduite horizontale de diamètre *d*, de longueur L et pour des critères de Reynolds inférieurs à 2 100, Γ est égal à $m/2\,L$ où *m* représente le débit massique de vapeur condensée.

Le coefficient de transfert est donné par la relation :

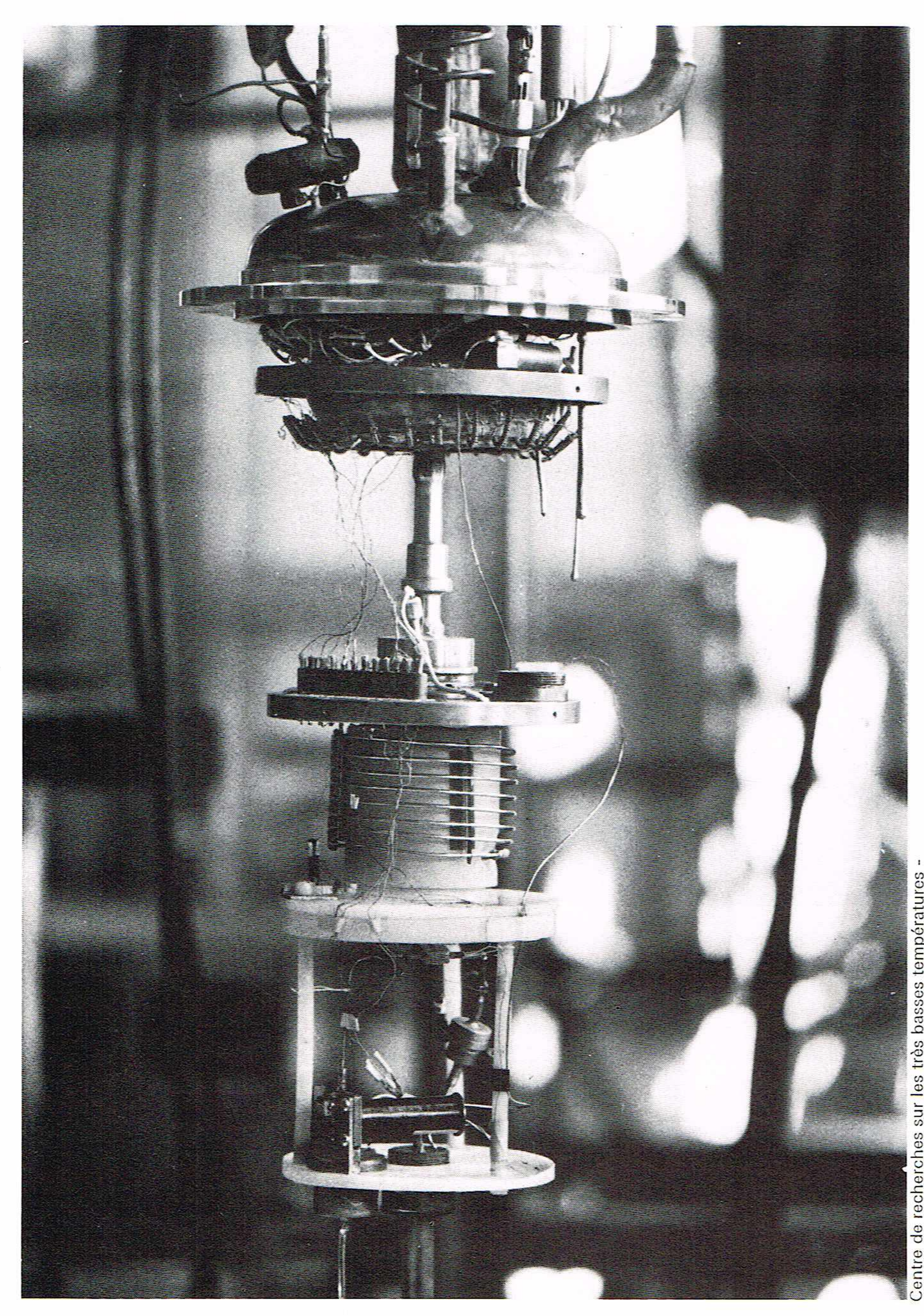
$$\mathcal{N}u_L = \frac{hd}{\lambda} = 0{,}73\left(\frac{\Lambda\rho^2 g d^3}{\lambda\mu\,(t_p - t_v)}\right)^{1/4} = 0{,}76\left(\frac{\rho^2 g d^3}{\mu\Gamma}\right)^{1/3}$$

Pour une rangée verticale de tubes cylindriques horizontaux où le condensat du tube supérieur tombe entièrement et sans éclaboussures sur le tube situé en dessous et pour des critères de Reynolds inférieurs à 2 100, le coefficient de transfert de la rangée horizontale N est lié à celui de la rangée du sommet (N = 1) par la relation :

(13) $$\frac{h_N}{h_1} = N^{0,75} - (N - 1)^{0,75}$$

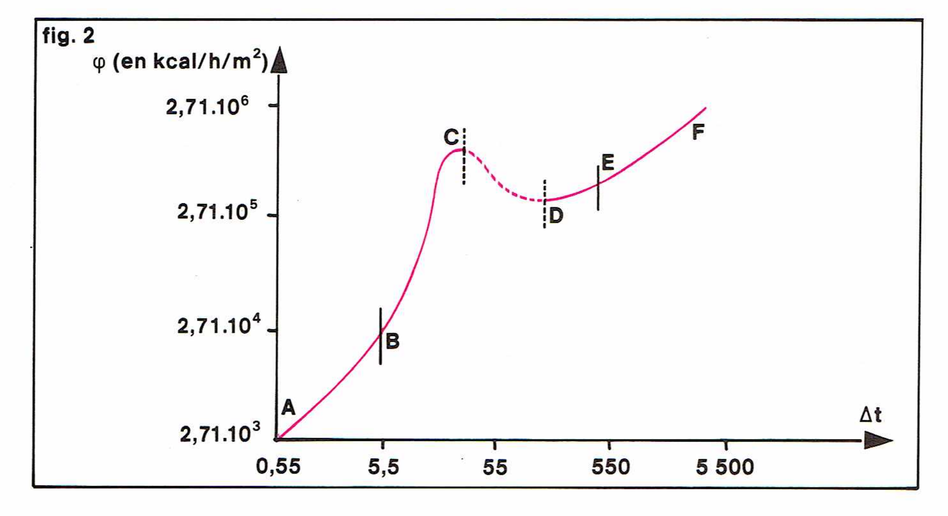
Ainsi $h_2 = 0{,}68\,h_1$, $h_3 = 0{,}60\,h_1$, $h_4 = 0{,}55\,h_1$, etc.

h_N décroît avec N mais le coefficient de transfert des tubes inférieurs est en général supérieur à celui donné par



▲ ***Partie inférieure d'un* réfrigérateur à dilution *d'hélium 3 dans l'hélium 4 : détail de l'échangeur et de la boîte de mélange.***

▼ ***Figure 2 : courbe du flux de chaleur transféré en fonction de la différence de température Δt, lors de la vaporisation d'un liquide ; on peut noter la présence de cinq zones.***



la relation **(13)** par suite de la turbulence provoquée par les clapotis et les éclaboussures du condensant tombant d'un tube sur un autre.

Pour une rangée de N tubes horizontaux, la valeur moyenne du coefficient de transfert est telle que :

$$\frac{\overline{h_N}}{h_1} = N^{-1/4}$$

Bien que le coefficient de transfert pour un tube horizontal soit supérieur au coefficient de transfert obtenu pour le tube placé verticalement, le coefficient de transfert moyen pour une rangée de N tubes horizontaux devient rapidement inférieur au coefficient de transfert du tube vertical.

Généralement, la condensation est réalisée à l'extérieur des tubes. Cependant, dans le cas de vapeurs corrosives ou des rebouilleurs à vapeur, on préfère effectuer la condensation à l'intérieur de tubes.

Pour des tubes verticaux où la vapeur et le condensat s'écoulent à co-courant de haut en bas, et tant que le régime d'écoulement du film liquide reste laminaire, le coefficient de transfert pourra être évalué par la relation :

$$h = 1{,}5 \left[\frac{\Lambda \lambda^2 \rho}{6\ \mu L\ (t_v - t_p)}\ \rho_v\ u_v^2\right]^{1/3}$$

u_v est la vitesse de la vapeur dans le tube. Cette relation est valable à condition que la masse volumique ρ_v et la vitesse u_v de la vapeur soient sensiblement constantes le long du tube, ce qui est le cas lorsque la fraction condensée demeure faible.

Si l'écoulement n'est plus contrôlé par les forces de gravité mais par celles de viscosité, le coefficient de transfert pourra être évalué par des corrélations plus empiriques proposées par Carpenter et Colburn (*General Discussion on Heat Transfer,* London, 1951, ASME, New York) ou par Boyko-Kruzhilim (*Inter. J. Heat Mass Transfer,* 10, 361 [1967]).

Pour des condensations à l'intérieur de tubes cylindriques horizontaux et pour de faibles débits de vapeur, on pourra utiliser la modification de l'équation de Nusselt préconisée par Kern (*Process Heat Transfer,* Mc Graw Hill, New York, [1950]), soit :

$$h = 0{,}612 \left(\frac{\Lambda \lambda^3 \rho_l\ (\rho_l - \rho_v)\ g}{\mu d\ (t_v - t_p)}\right)^{1/4}$$

Une relation plus précise a été proposée par Chaddock (*Refrig. Eng.* 65, 36 [1957]). Ce type de condensation est réalisé industriellement dans les rebouilleurs utilisant la vapeur d'eau comme fluide chaud.

Nous ne rappelons pas ici les lois de condensation des mélanges de vapeur saturée et non saturée en présence d'un gaz non condensable.

● *L'ébullition (ou vaporisation)*

La vaporisation est la transformation isotherme d'une phase liquide pure en vapeur. La chaleur nécessaire à la vaporisation peut être apportée par convection et rayonnement à partir d'une source n'étant pas en contact direct avec le liquide ou par une surface métallique baignant dans la phase liquide. Ce dernier type de vaporisation est plus fréquent et il n'apparaît de vapeur que si le liquide est suffisamment surchauffé à sa surface libre.

Le premier type de vaporisation n'est rien d'autre que l'évaporation. La chaleur nécessaire à l'évaporation est fournie par la source de chaleur constituée par l'atmosphère gazeuse située au-dessus du liquide. A l'exception d'une diminution du niveau du liquide dans un récipient initialement rempli, aucune autre manifestation visuelle n'accompagne le phénomène de vaporisation.

Le deuxième type de vaporisation ou d'ébullition a été analysé clairement en 1934 par Nikuyama (*J. Soc. Mech. Engrs. Japan*, 37, 367 [1934]), mais Leidenfrost en 1756 (*De aquae communis nonnulis qualitatibus tractatus,* Duisburg, 1756) et Lang en 1888 (*Trans. Inst. Engrs. Shipbuilders, Scot.* 32, 279 [1888]) avaient déjà signalé l'existence de flux calorifiques minimal et maximal transmissibles par ébullition.

Les courbes donnant le flux transféré en fonction de la différence de température $\Delta t = t_p - t_l$ (où t_l est la température du liquide) présentent au moins cinq zones constituant ainsi la difficulté principale lors du calcul des évaporateurs et des chaudières.

Dans le cas de l'eau, on obtient des courbes semblables à celle reportée sur la *figure* 2.

Dans la zone AB, le liquide est chauffé par convection naturelle et l'évaporation ne se produit qu'en surface. Étant donné le mécanisme mis en jeu, le flux transféré est proportionnel à $(\Delta t)^{5/4}$.

Dans la zone BC, des bulles de vapeur se forment au niveau des noyaux actifs existant à la surface métallique et s'élèvent à travers le liquide, produisant des courants de circulation naturelle. L'ébullition est tout d'abord intranucléaire (les bulles n'atteignant pas la surface libre) puis nucléaire ou nucléée (les bulles de vapeur viennent crever sur la surface du liquide). Dans cette zone, le flux varie comme $(\Delta t)^n$, n étant compris entre 3 et 4. Au point C, le flux calorifique passe par un maximum pour une différence de *température* dite *critique*.

Dans la zone CD, il commence à apparaître un film de vapeur sur la surface métallique, et le flux de chaleur décroît lorsque Δt croît. C'est la région dite *région d'ébullition transitoire* ou *instable*.

Au point D, le flux est minimal : c'est le *point de Leiden frost*.

A partir de D, le film de vapeur occupe toute la surface métallique. C'est la zone d'ébullition en film. Entre D et E, le transfert de chaleur dans le film gazeux se fait essentiellement par conduction et, au-delà de E, le transfert par rayonnement devient de plus en plus prédominant.

Le point F correspond à la fusion et à la destruction de la surface métallique.

Du point de vue industriel, seules les zones d'ébullition nucléée et d'ébullition en film stable présentent un intérêt.

Le mécanisme d'ébullition nucléaire n'est pas encore établi de manière définitive mais il existe de nombreuses déterminations expérimentales du coefficient de transfert. Le choix entre les différentes corrélations proposées ne repose que sur une appréciation personnelle dépendant du problème d'ébullition étudié.

En effet, le coefficient de transfert dépend non seulement des propriétés physico-chimiques du liquide à vaporiser, mais aussi de la différence de température Δt, de la pression totale, de la nature et de l'état de surface de la source ainsi que de la forme géométrique du système dans lequel s'effectue la vaporisation. Pour la conception d'un évaporateur, il sera indispensable de connaître les différences de température au point critique et au point de Leiden frost.

Des corrélations fondées sur un grand nombre de données expérimentales ont été proposées. Indiquons à titre d'exemple celle de Rohsenow (*Trans. Am. Soc. Mech. Engrs*, 74, 969 [1956]), soit :

$$\frac{h\beta'}{\lambda}\left(\frac{\sigma}{g\ (\rho_l - \rho_v)}\right)^{1/2} = C_r \left[\left(\frac{\sigma}{g\ (\rho_l - \rho_v)}\right)^{1/2} \frac{\beta' m}{\mu \Omega}\right]^{2/3} \left(\frac{\mu C_p}{\lambda}\right)^{-0,7}$$

où β' est l'angle de contact que fait la bulle avec la surface en degrés, σ la tension superficielle du liquide à la température d'ébullition, m le débit massique du liquide vaporisé, et Ω l'aire de la surface métallique.

La constante C_r n'est pas à proprement parler une constante puisqu'elle varie de 0,006 à 0,015 (Westawer, *Advances in Chemical Engineering*, vol. I, Academic Press, New York [1956]).

Le flux maximal en ébullition nucléée peut être prévu par différentes relations, et en particulier par celle préconisée par Kutateladse-Zuber (*Trans. Am. Soc. Mech. Engrs*, 80, 711 [1958]), soit :

$$\varphi\ (W/m^2) = \rho_v \Lambda \left[\frac{g\ (\rho_l - \rho_v)\ \sigma}{\rho_v^2}\right]^{1/4}$$

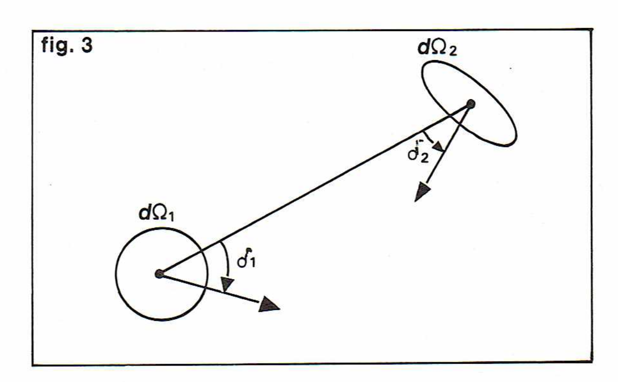
Dans le cas de l'ébullition en film (ou caléfaction), on pourra utiliser la relation due à Bromley, soit :

$$h = 0,620 \left[\frac{g \Lambda \lambda_v^2 \rho_v\ (\rho_l - \rho_v)}{\mu_v d\ \Delta t}\right]^{1/4}$$

Pour l'ébullition à l'intérieur des tubes, le phénomène est encore plus complexe, car les bulles de vapeur émises ne montent plus librement dans l'étroite section du tube. Seules des données expérimentales sont disponibles pour résoudre ce problème.

Le transfert par rayonnement

L'importance relative des divers transports de la chaleur d'un corps à un autre diffère beaucoup selon la température. Les phénomènes de conduction et de convection dépendent principalement des différences de températures et très peu de leur niveau, alors que les échanges de chaleur par rayonnement augmentent rapidement avec ce niveau. Il s'ensuit qu'aux basses températures la plus grande partie de la chaleur sera transmise généralement par conduction et convection, alors qu'aux températures élevées le transfert par rayonnement devient rapidement prédominant.



◀ ***Figure 3 : représentation du rayonnement entre deux éléments de surface $d\Omega_1$ et $d\Omega_2$.***

Nature du rayonnement thermique

Soit le faisceau de rayonnement entre deux éléments de surface $d\Omega_1$ et $d\Omega_2$. L'élément $d\Omega_1$ est vu du centre de $d\Omega_2$ sous l'angle solide $d\omega_2 = \frac{d\Omega_1 \cos \delta_1}{r^2}$ (*fig.* 3). De même l'élément $d\Omega_2$ est vu du centre de $d\Omega_1$ sous l'angle solide

$$d\omega_1 = \frac{d\Omega_2 \cos \delta_2}{r^2}$$

Le flux q rayonné par l'élément $d\Omega_1$ par unité d'angle solide porte le nom d'intensité I_1 du rayonnement et le débit de chaleur rayonné par la surface $d\Omega_1$ vers $d\Omega_2$ est donné par la *loi de Lambert* (ou loi du cosinus), soit :

(14) $$d\Phi_1 = q d\Omega_1 \cos \delta_1 = I_1 d\omega_1 d\Omega_1 \cos \delta_1$$

En l'absence d'absorption et de diffraction, l'intensité du rayonnement issu de $d\Omega_1$ dans le faisceau est constante.

Le pouvoir émissif e^0 d'une surface est par définition le flux émis par cette surface sur une surface hémisphérique située en avant de la surface émettrice. En intégrant l'équation **(14)**, on aboutit à la relation :

$$e^0 = \pi I$$

Les caractéristiques du rayonnement thermique entre deux surfaces sont bien connues dans le cas des *corps noirs* ou *corps radiants parfaits*.

Un corps noir absorbe intégralement tout rayonnement incident, et la qualité et l'intensité du rayonnement qu'il émet ne dépendent que de sa température. Le pouvoir émissif d'un corps noir vers une surface hémisphérique située en avant de la surface noire est donné par la loi de Stéphan-Boltzmann : $e^0 = \sigma T^4$, T étant exprimé en °K.

La constante σ dite de Stéphan vaut dans le système international : $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}\ W/m^2(°K)^4$.

Il est quelquefois intéressant de connaître la répartition du rayonnement du corps noir dans le spectre et le déplacement de cette répartition en fonction de la température.

Si e_λ^0 est le pouvoir émissif monochromatique pour la longueur d'onde λ de telle sorte que $e_\lambda^0 d\lambda$ représente le pouvoir émissif à travers la demi-sphère située en avant pour les rayonnements de longueurs d'onde comprises entre λ et $\lambda + d\lambda$, la relation entre e_λ^0, λ, T est donnée par la loi de Planck :

$$e_\lambda^0 = \frac{2\ \pi h c^2 \lambda^{-5}}{e^{hc/k\lambda T} - 1}$$

c est la vitesse de la lumière $c = 2,997\,9 \cdot 10^8$ m/s
h est la constante de Planck $h = 6,623\,6 \cdot 10^{-34}$ W
k est la constante de Boltzmann $k = 1,308\,2 \cdot 10^{-23}$ J/°K

La loi de Planck est plus facile à retenir sous la forme :

$$\frac{e_\lambda^0}{T^5} = f\ (\lambda T) = \frac{c_1\ (\lambda T)^{-5}}{e^{c_2/\lambda T} - 1}$$

Avec $c_1 = 3,740\,3 \cdot 10^{-16}$ W · m²
et $c_2 = 1,438\,7 \cdot 10^{-2}$ m · °K.

Le pouvoir monochromatique à une température quelconque part de 0 (à $\lambda = 0$), passe par un maximum et revient à 0 pour $\lambda = +\infty$. Pour toutes les longueurs d'onde, il croît avec la température, mais il croît d'autant plus vite que la longueur d'onde est plus courte, aussi la valeur du maximum se déplace vers les courtes longueurs d'onde lorsque la température s'élève. La longueur d'onde de l'intensité maximale est inversement proportionnelle à la température absolue ; c'est la **loi de déplacement de Wien**, soit :

$$\lambda_{max} T = 0{,}289\,8 \cdot 10^{-2}\ \text{m} \cdot {}^\circ\text{K}$$

Échange par rayonnement entre surfaces solides séparées par un milieu non absorbant

⋆ *Coefficients d'absorption* (α) *et d'émission* (ε)

Le rapport du pouvoir émissif d'une surface réelle à celui de la surface noire à la même température est appelé *coefficient* ou *facteur d'émission*. Ce facteur peut être spécifique d'une longueur d'onde, d'une direction ou de manière globale (coefficient d'émission monochromatique directionnel ou total).

De même, les rayonnements frappant une surface réelle ne sont pas totalement absorbés. Une partie est réfléchie ou diffusée ou même transmise à travers le corps (cas des corps transparents au rayonnement thermique dits diathermiques). La fraction absorbée est le *coefficient d'absorption;* il peut être spécifique d'une longueur d'onde ou global. D'après la loi de Kirchhoff, les coefficients d'absorption et d'émission pour une surface et son environnement à la même température sont égaux, tant du point de vue monochromatique que du point de vue global.

D'une manière générale, la différence entre les facteurs d'absorption et d'émission est due à la différence de température du rayonnement incident et du rayonnement émis. Cependant, de nombreux corps sont tels que le facteur d'absorption monochromatique est indépendant de la longueur d'onde et, par suite, de la température du rayonnement incident. Dans ces conditions, la valeur unique du facteur d'absorption est égale au facteur total d'émission de la surface qualifiée de *grise*.

Par définition, les facteurs d'absorption et d'émission sont des grandeurs comprises entre 0 (corps transparents) et 1 (corps noir), mais, pour un même matériau, les coefficients d'émission peuvent varier notablement en fonction de la température, de l'état de surface et du degré d'oxydation dans le cas des métaux. Les coefficients d'absorption dépendent non seulement des paramètres précédents mais également de la qualité du rayonnement incident mesurée par sa distribution spectrale.

On trouvera dans les ouvrages généraux indiqués précédemment des tableaux et des courbes donnant les valeurs et les variations des coefficients d'absorption et d'émission.

⋆ *Échange entre surfaces noires séparées par un milieu transparent, en présence ou non de surfaces sans flux*

Pour trouver l'échange de chaleur par rayonnement entre les éléments de surface $d\Omega_1$ et $d\Omega_2$, il suffit d'appliquer la loi du cosinus aux deux éléments de surface. On obtient :

$$d\Phi_{1 \rightleftarrows 2} = d\Phi_1 - d\Phi_2 = I_1 d\Omega_1 \cos\delta_1\, d\omega_1 - I_2 d\Omega_2 \cos\delta_2 d\omega_2$$

En explicitant $d\omega_1$ et $d\omega_2$ et en exprimant les intensités en fonction des pouvoirs émissifs, on aboutit à la relation :

$$d\Phi_{1 \rightleftarrows 2} = \frac{\sigma}{\pi}\,(T_1^4 - T_2^4)\,\frac{d\Omega_1 d\Omega_2 \cos\delta_1 \cos\delta_2}{r^2}$$

Pour des surfaces noires aux températures uniformes T_1 et T_2, le débit de chaleur échangé s'obtient par intégration de la relation précédente, soit :

(15) $$d\Phi_{1 \rightleftarrows 2} = \sigma\,(T_1^4 - T_2^4) \iint_{\Omega_1\Omega_2} \frac{1}{\pi}\,\frac{\cos\delta_1 \cos\delta_2}{r^2}\, d\Omega_1 d\Omega_2$$

Le calcul de l'intégrale du 2[e] membre est possible analytiquement pour certaines géométries simples. On écrit généralement le résultat de cette intégrale sous les deux formes équivalentes suivantes :

(16) $$\iint_{\Omega_1\Omega_2} \frac{1}{\pi}\,\frac{\cos\delta_1 \cos\delta_2}{r^2}\, d\Omega_1 d\Omega_2 = \Omega_1 F_{12} = \Omega_2 F_{21}$$

F_{12} est la fraction du rayonnement émis par la surface Ω_1 dans toutes les directions qui frappe la surface Ω_2 (et qui est absorbé par Ω_2 si la surface Ω_2 est noire). De même, F_{21} est la fraction du rayonnement émis par la surface Ω_2 dans toutes les directions qui frappe la surface Ω_1. F_{12} et F_{21} sont appelés *facteur géométrique* ou *facteur de forme*. La symétrie de l'intégrale donnant les facteurs géométriques implique l'égalité **(16)** entre les facteurs de forme F_{12} et F_{21}. Bien que ces facteurs soient établis dans le cas de surfaces noires pour des surfaces réelles, ils continueront à représenter la fraction du rayonnement émis par une des deux surfaces et reçu par l'autre (cette fraction n'étant pas nécessairement absorbée si la deuxième surface n'est pas noire).

Par suite de la signification physique des facteurs de forme, on aurait pu écrire *a priori* le débit de chaleur échangé entre deux surfaces noires Ω_1 et Ω_2, soit :

$$\Phi_{1 \rightleftarrows 2} = \sigma T_1^4 \Omega_1 F_{12} - \sigma T_2^4 \Omega_2 F_{21}$$

Dans cette écriture, les deux termes $\Omega_1 F_{12}$ et $\Omega_2 F_{21}$ doivent être nécessairement égaux pour qu'à l'équilibre thermique $T_1 = T_2$, le débit net échangé soit nul. On retrouve bien les relations **(15)** et **(16)**.

En présence de n surfaces noires, par suite de leur signification physique les facteurs de forme devront satisfaire aux égalités suivantes :

(17) $$\sum_{j=1}^{n} F_{ij} = 1 \qquad \forall i = 1, 2, \ldots, n$$
$$\Omega_i F_{ij} = \Omega_j F_{ji} \qquad \forall j = 1, 2, \ldots, n$$

Pour des géométries particulières telles que les surfaces engendrées par des droites parallèles à une direction donnée, les facteurs de formes sont calculables facilement sans qu'il soit nécessaire de résoudre la double intégrale de surface. En outre, dans de nombreux cas pratiques, les surfaces Ω_1 et Ω_2 par exemple se trouvent en présence de surfaces pour lesquelles le débit de chaleur net échangé par rayonnement est nul. De telles surfaces peuvent être totalement réfléchissantes ou partiellement absorbantes mais alors le débit émis est sensiblement égal au débit absorbé. De telles surfaces sont dites *sans flux*.

En particulier, les réfractaires des fours à combustion se comportent généralement comme des surfaces sans flux. Seule la chaleur apportée par convection par le gaz intérieur au four est transmise par conduction à travers la paroi au milieu extérieur. Mais comme le débit de chaleur apporté par rayonnement sur les parois du réfractaire est très grand par rapport aux pertes thermiques, l'hypothèse d'un débit net rayonné nul pour les parois du four est une très bonne approximation. Cette hypothèse simplifie notablement les problèmes de transfert de chaleur par rayonnement entre une source et un récepteur placés dans l'enceinte d'un four.

En présence de surfaces sans flux, la fraction du rayonnement émis par la surface noire Ω_1 dans toutes les directions et qui frappe la surface noire Ω_2 ne se limite pas à F_{12} (rayonnement direct). Elle est en réalité supérieure à F_{12} puisqu'une autre fraction du rayonnement émis par Ω_1 peut frapper Ω_2 après réflexion sur les surfaces réfractaires ou sans flux Ω_R. Le facteur de forme ainsi défini sera désigné par $\overline{F}_{12}$ et le débit de chaleur échangé entre les surfaces noires Ω_1 et Ω_2 en présence des surfaces sans flux Ω_R sera égal à :

$$\Phi_{1 \rightleftarrows 2} = \Omega_1 \overline{F}_{12}\, \sigma\,(T_1^4 - T_2^4)$$

Comme les facteurs F_{ij}, les facteurs $\overline{F}_{ij}$ satisfont aux relations **(17)**.

Dans la plupart des ouvrages généraux cités précédemment, on trouvera des courbes donnant les facteurs F_{ij} et $\overline{F}_{ij}$ pour des géométries classiques rencontrées lors des études de fours où les transferts par rayonnement sont importants.

⋆ *Échange de chaleur entre surfaces non noires séparées par un gaz transparent, en présence ou non de surfaces réfractaires*

Soit une enceinte composée de surfaces non noires Ω_1, Ω_2, ... et de surfaces réfractaires Ω_R, Ω_S... En régime stationnaire, le débit de chaleur net issu de Ω_1 est la somme de tous ses échanges mutuels avec Ω_1, Ω_2, ... Cependant, l'échange entre Ω_1 et Ω_2 est le fruit d'un jeu complexe mettant en œuvre des réflexions à partir de toutes les surfaces réfractaires ou non.

On peut écrire encore le débit émis par la surface Ω_1 et absorbé par la surface Ω_2 sous la forme :

$$\Phi_{1 \to 2} = \Omega_1 \mathcal{F}_{12} \sigma T_1^4$$

De même, le débit émis par Ω_2 et absorbé par Ω_1 peut être écrit sous la forme :

$$\Phi_{2 \to 1} = \Omega_2 \mathcal{F}_{21} \sigma T_2^4$$

Dans ces conditions, le débit net échangé par rayonnement entre Ω_1 et Ω_2 est tel que :

$$\Phi_{1 \rightleftarrows 2} = \Omega_1 \mathcal{F}_{12} \sigma T_1^4 - \Omega_2 \mathcal{F}_{21} \sigma T_2^4$$

Puisque, à l'équilibre thermique ($T_1 = T_2$), le débit net transféré doit être nul, les facteurs de forme ainsi définis vérifient également les relations **(17)**. Mais contrairement aux coefficients F et $\overline{F}$, leur évaluation dans le cas le plus général se révèle délicate, voire impossible. On simplifie leur calcul en répartissant les zones émettrices, réceptrices et les surfaces sans flux en un nombre restreint de zones à température constante. Lorsque les sources et les puits ainsi définis peuvent être assimilés à des surfaces grises, Mac Adams (*Transmission de la chaleur*, Dunod, Paris [1964]) suggère une méthode simple permettant d'évaluer les facteurs de forme supposés indépendants de la répartition des températures des puits, des sources et des surfaces sans flux. En admettant par exemple que toutes les surfaces émettrices sauf une sont à la température 0 °K, les bilans d'énergie sur chacune des surfaces permettent de trouver les valeurs numériques des coefficients de forme $\mathcal{F}$.

Cette procédure n'est plus valable dans le cas des surfaces réelles puisque les facteurs d'absorption dépendent de la température du rayonnement incident. Les coefficients de forme dépendent de la température mais, comme le précise Mac Adams, on ne commet pas d'erreur significative en remplaçant les facteurs d'absorption et les facteurs d'émission par une valeur moyenne tenant compte des variations des facteurs d'absorption et d'émission en fonction de la température. On se ramène donc à nouveau au cas de surfaces grises. Soulignons cependant que les limitations de cette méthode n'ont pas encore été étudiées complètement.

★ *Rayonnement des gaz non transparents*

Si les gaz diatomiques (oxygène, azote, hydrogène) sont transparents au rayonnement thermique dans tout le spectre d'émission du corps noir (visible et infrarouge), il n'en est pas de même pour le gaz carbonique et la vapeur d'eau (produit de combustion des hydrocarbures) qui présentent des bandes d'absorption dans l'infrarouge. D'après la loi de Kirchhoff, ces gaz émettent donc un rayonnement thermique dans ces mêmes bandes de fréquence. D'autres constituants gazeux absorbent le rayonnement thermique (CO, CH_4, SO_2, NH_3, etc.) mais leur influence reste généralement faible devant celle de la vapeur d'eau et du gaz carbonique.

L'absorption du rayonnement thermique par les gaz s'effectue à l'échelle moléculaire. Elle est proportionnelle au nombre de molécules rencontrées sur le trajet du faisceau d'énergie rayonné et par suite proportionnelle à la pression partielle du gaz et au trajet dans le gaz.

Soit un faisceau monochromatique traversant un milieu absorbant et transportant au point d'abscisse x le flux d'énergie φ_λ. Entre x et $x + dx$ la fraction $- d\varphi_\lambda / \varphi_\lambda$ absorbée est proportionnelle à la longueur dx et à la pression partielle p, d'où :

(18) $$-\frac{d\varphi_\lambda}{\varphi_\lambda} = k_\lambda p dx$$

Par l'intégration de l'équation **(18)**, on obtient la **loi de Beer**, soit :

$$\varphi_\lambda = \overset{0}{\varphi_\lambda} \exp(-k_\lambda p x)$$

Sur un trajet de longueur L dans le gaz et pour une pression partielle constante du gaz, la fraction $\varphi_\lambda / \overset{0}{\varphi_\lambda}$ est transmise et la fraction absorbée sur la longueur L est telle que :

$$\alpha_\lambda = 1 - \exp(-k_\lambda p L)$$

Le facteur d'absorption global sera obtenu par une sommation dans les domaines spectraux où le gaz est absorbant.

Pour évaluer le coefficient d'absorption puis le débit de la chaleur échangé entre le gaz et les surfaces entourant le gaz, il est nécessaire de donner une méthode de calcul tenant compte de la forme géométrique de l'enceinte contenant le gaz. Une méthode exposée dans l'ouvrage de Mac Adams conduit à définir une épaisseur moyenne fictive L telle que l'émission vraie pour le gaz à la température T_G dans l'enceinte donnée soit calculée par la formule $e^0 (T_G)\, \varepsilon_{TG} pL$. La valeur de L ainsi définie dépend en général du gaz dans lequel se produit l'émission et du produit py, où y est une caractéristique dimensionnelle de la forme du système gazeux ; heureusement, dans les applications, L figure presque toujours sous forme d'une fraction presque constante de y. En outre, pour les faibles valeurs du produit pL, il est possible de trouver la valeur limite L^0. Elle est égale à 4 fois le rapport :

$$\frac{\text{volume de l'enceinte gazeuse}}{\text{surface latérale des parois de l'enceinte}}$$

La comparaison entre les valeurs de L et L^0 pour différentes formes géométriques montre que l'on peut évaluer L à partir de L^0 à l'aide de la relation : $L = 0{,}85\ L^0$.

Des valeurs des facteurs totaux d'émission pour le gaz carbonique et la vapeur d'eau ont été obtenues expérimentalement par Hottel et Mangelsdorf (*Trans. Am. Inst. Chem. Engrs.*, 31, 517 [1935]) et par Hottel et Smith (*Trans. ASME. Iron and Steel*, 55, 56, 39 [1933]).

Pour le gaz carbonique, les courbes donnent le facteur d'émission total en fonction de la température du gaz T_G et du produit $p_c L$ (p_c est la pression partielle en gaz carbonique) pour une pression totale de 1 atmosphère. Lorsque la pression totale est différente de 1 atmosphère, on emploie un facteur correctif. Pour la vapeur d'eau, le coefficient d'absorption dépend en plus de la pression partielle p_e de l'eau. Les courbes sont relatives à une pression partielle tendant vers zéro ; pour des pressions partielles différentes de zéro et une pression totale différente de 1 atmosphère, on emploie un autre facteur correctif.

Les facteurs d'absorption se déduisent des facteurs d'émission par des règles empiriques expérimentales rappelées dans les principaux ouvrages généraux. On trouvera également dans ces ouvrages les règles permettant de calculer les facteurs totaux d'émission et d'absorption des mélanges de vapeur d'eau et de gaz carbonique.

La longueur caractéristique du rayonnement gazeux ayant été précisée, il est alors possible d'évaluer le débit de chaleur net échangé par rayonnement entre le gaz et la surface noire Ω_1, soit :

$$\Phi_{G \rightleftarrows 1} = \Omega_1 \sigma (\varepsilon_G T_G^4 - \alpha_{G1} T_1^4)$$

Dans α_{G1} l'indice 1 rappelle que la température du rayonnement est celle de la surface noire T_1. Si les températures T_1 et T_G sont peu différentes (en pratique, même lorsque T_1 et T_G sont dans un rapport 2), on ne commet qu'une faible erreur en écrivant le débit net transféré sous la forme :

$$\Phi_{G \rightleftarrows 1} = \sigma \varepsilon_{G, \frac{T1 + TG}{2}} \frac{4 + a + b - c}{4} (T_G^4 - T_1^4)$$

Des courbes donnant la valeur des coefficients a, b, c pour la vapeur d'eau et le gaz carbonique sont données dans les ouvrages généraux consacrés au transfert de chaleur par rayonnement.

Si dans l'enceinte gazeuse se trouvent des sources et des récepteurs de natures quelconques et à des températures différentes, le calcul du débit échangé entre le gaz et une quelconque surface se fera en introduisant un facteur géométrique comme dans le cas d'un gaz transparent. Ainsi, le débit échangé entre le gaz et la surface Ω_1 sera posé égal à :

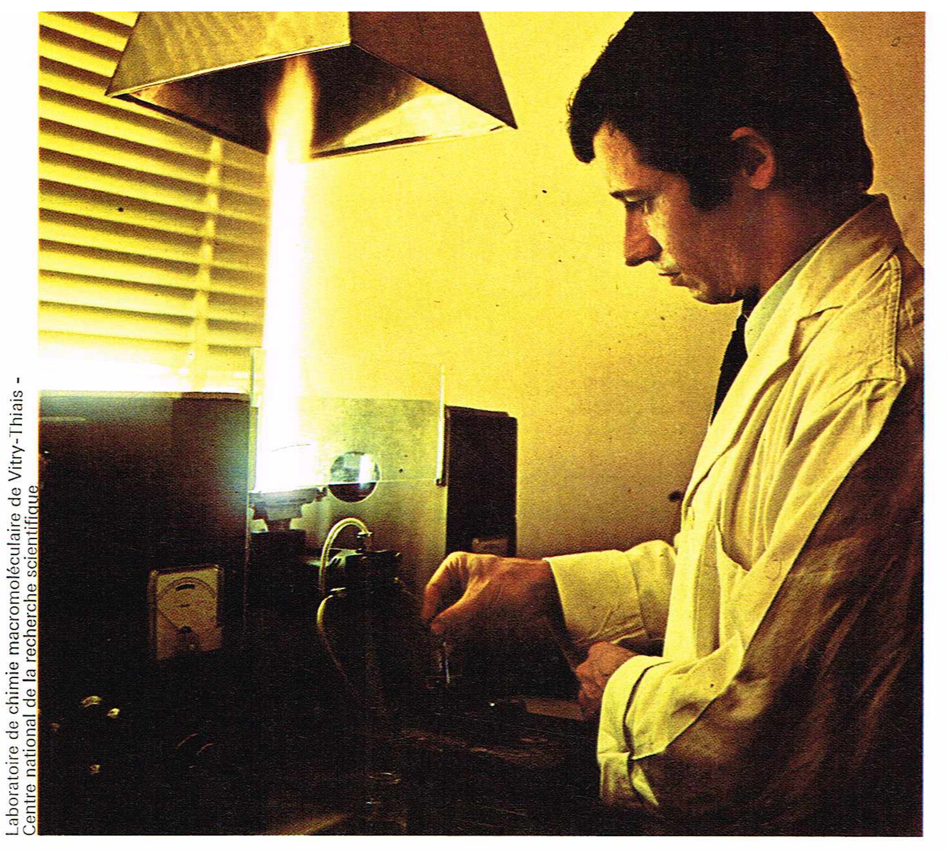
$$\Phi_{G \rightleftarrows 1} = \Omega_1 \mathcal{F}_{1G} \sigma (T_G^4 - T_1^4)$$

La détermination des facteurs $\mathcal{F}_{1G}$ sera voisine de celle des gaz transparents dans le cas d'un gaz gris pour lequel les facteurs totaux d'absorption et d'émission sont égaux. Dans ces conditions, si f désigne le facteur de transmission pour une distance L, le facteur total d'émission du gaz gris est :

— pour une épaisseur égale à L : $\varepsilon_L = (1 - f)$;
— pour une épaisseur égale à nL : $\varepsilon_{nL} = (1 - f)^n$.

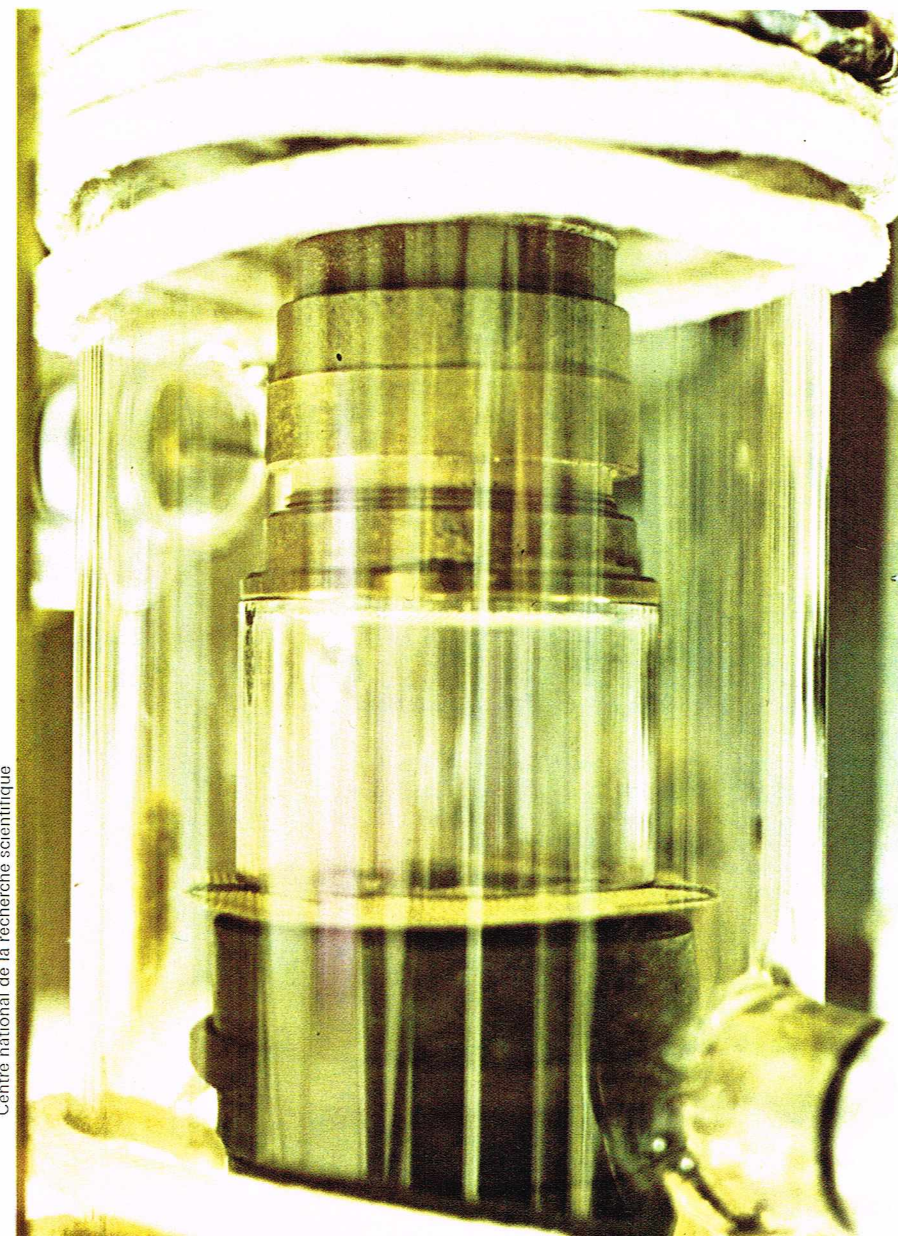
En pondérant les débits échangés entre les différentes surfaces par le facteur de transmission correspondant, on peut déterminer ainsi les facteurs géométriques, puis le débit de chaleur net échangé par rayonnement.

Pour un gaz réel, on divise le spectre de fréquence en différentes classes $x, y, ..., z$ et, pour une épaisseur du


Laboratoire de chimie macromoléculaire de Vitry-Thiais - Centre national de la recherche scientifique

▲ ***Portées à haute température par conduction et convection, les particules solides contenues dans les gaz émettent un rayonnement dans tout le spectre infrarouge et visible. Cette propriété trouve son application dans la technique de spectrophotométrie de flamme.***

▼ ***Brûleur à flammes plates utilisé pour l'étude des profils de front de flamme.***


Laboratoire de chimie de la combustion et des hautes températures - Centre national de la recherche scientifique

gaz égale à L, on écrit que le facteur de transmission est tel que :

$$f_L = xf_{xL} + yf_{yL} + ... + zf_{zL}$$

Si q désigne le nombre de classes, on écrit les $(2q - 1)$ relations donnant les facteurs de transmission pour les épaisseurs L, 2 L, ..., $(2q - 1)$ L. En particulier :

$$f_{qL} = x\,(f_{xL})^q + y\,(f_{yL})^q + ... + z\,(f_{zL})^q$$

Le système des $(2q - 1)$ équations ainsi obtenues permet de calculer les $(q - 1)$ facteurs de pondération inconnus (en effet $x + y + ... + z = 1$) et les q facteurs de transmission $f_x, f_y, ..., f_z$. Ensuite, chacune des classes étant considérée se comporter comme un gaz gris de facteur de transmission donné, on peut donc évaluer les différents facteurs de forme pour chacune des classes. Le facteur de forme du gaz réel s'obtient par pondération des facteurs de forme correspondant à chacune des classes. Ainsi, le facteur de forme $\mathcal{F}_{12}$ du gaz réel sera donné par la relation :

$$[\mathcal{F}_{12}]^{réel} = x\,[\mathcal{F}_{12}]^{gris}_{fx} + y\,[\mathcal{F}_{12}]^{gris}_{fy} + ... + z\,[\mathcal{F}_{12}]^{gris}_{fz}$$

On voit apparaître très rapidement la complexité du calcul. Heureusement que, dans de nombreux cas, on pourra se limiter à n'envisager que 2 classes dans le spectre des fréquences.

* *Rayonnement des flammes et des nuages de particules*

Les flammes sont généralement éclairantes, car au sein des gaz portés à haute température par la combustion se trouvent dispersées de fines particules constituées le plus souvent par du carbone formé au cours des réactions de combustion. Ces particules solides portées à haute température par conduction et convection des gaz environnants émettent un rayonnement dans tout le spectre infrarouge et visible. Suivant la dimension des flammes et suivant la densité de particules solides qu'elles renferment, leurs facteurs d'émission (ou d'absorption) peuvent varier largement et atteindre presque l'unité pour les flammes épaisses et denses. Pour les particules de carbone formées par craquage des hydrocarbures, on admet souvent que leur dimension est de l'ordre de

$$0{,}3\ \mu m\ (3 \cdot 10^{-7}\ m).$$

Dans ces conditions, on peut montrer que la différence de température entre le gaz et les particules solides est très faible, de l'ordre de 1 °C.

● *Température de la flamme*

La température vraie de la flamme peut être mesurée directement à l'aide d'un pyromètre monochromatique qui repère en fait la luminance de la flamme pour une longueur d'onde donnée (la luminance est l'intensité lumineuse émise dans une direction donnée). La méthode de Kurlbaun permet de calculer la température vraie à partir de mesures faites au pyromètre monochromatique.

● *Facteur total d'émission de la flamme*

La connaissance de la température vraie de la flamme permet le calcul de son facteur total d'émission par une simple mesure, au pyromètre à rayonnement total, de sa température d'émittance T_F. En effet, d'après la loi de Stéphan-Boltzmann :

$$\varepsilon_T = \frac{T_F^4}{T^4}$$

— *Étude des flammes contenant de très fines particules ou suies*

Si l est la largeur de la flamme, le facteur d'absorption monochromatique est donné par la loi :

$$\alpha_\lambda = 1 - e^{-k'_\lambda l}$$

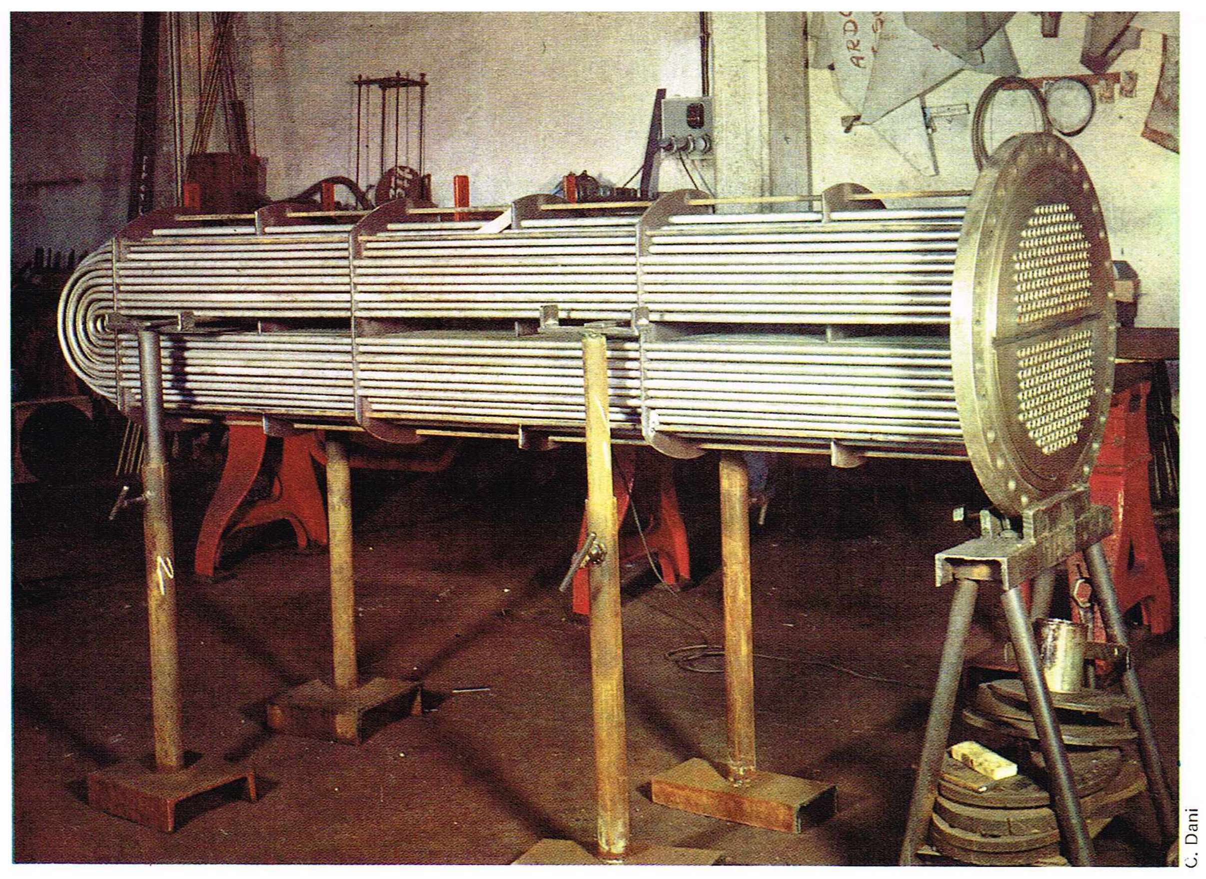
où k'_λ est un facteur variant avec la longueur d'onde λ. L'expérience montre que :

$$k'_\lambda = \frac{K}{\lambda^a}$$

où K est une constante et où l'exposant a, légèrement variable, reste voisin de 1. Il en résulte que :

$$\alpha_\lambda = 1 - e^{-\frac{Kl}{\lambda}}$$

Ainsi, à l donné, la température de luminance de la flamme est d'autant plus forte qu'elle est mesurée avec une longueur d'onde plus petite. A l'aide de deux mesures au pyromètre monochromatique $\lambda_R = 0{,}665\ \mu m$ (rouge) et $\lambda_V = 0{,}555\ \mu m$ (vert), on peut déterminer Kl.



◀ ***Ensemble du faisceau de tubes en U en acier inoxydable d'un échangeur de chaleur ayant une potentialité de 7 200 kcal/h.***

C. Dani

Des abaques établis par Hottel et Broughton (*Ind. Eng. Chem. Anal.* Ed. 4, 166 [1932]) permettent, à partir des deux mesures précédentes, de déterminer simultanément la valeur de K*l*, la température vraie de la flamme et son facteur total d'émission.

● *Étude des flammes contenant de grosses particules solides*

Il s'agit essentiellement des flammes de charbon pulvérisé dont les particules ont des dimensions de plusieurs dizaines de microns, très supérieures à la valeur des longueurs d'onde du rayonnement. Dans ces flammes, les particules jouent simplement le rôle d'écrans pour le rayonnement qui les frappe sans diffusion appréciable. Le facteur total d'émission peut être calculé directement par l'expression :

$$\varepsilon = 1 - e^{-Kl} = 1 - e^{-\frac{450\,wl}{\rho T d}}$$

w est la concentration massique du solide en suspension (en kg/m^3), ρ est la masse volumique du solide (en kg/m^3), T est la température vraie de la flamme (en °K), *l* est l'épaisseur de la flamme (en m), *d* est le diamètre des particules (en m).

Étude des principaux appareils de transformation de chaleur

Les appareils de transformation de la chaleur peuvent être classés en deux grandes familles :

— La première correspond à des transferts de chaleur sans changement de phases. Ces transferts se font à basses et moyennes températures dans les *échangeurs de chaleur* et à des températures plus élevées dans les *fours*.

— Dans la deuxième famille, le transfert thermique est accompagné d'un transfert de matière. Nous nous limiterons ici aux changements de phase liquide en phase vapeur.

La condensation d'une vapeur saturée ou non permet de récupérer des quantités de chaleur très importantes, utilisées par la suite pour mener à des températures voulues le fluide circulant de l'autre côté de la surface sur laquelle s'effectue la condensation. Cette transformation se déroule généralement dans des *condenseurs* utilisant, par conséquent, de la vapeur. Cette vapeur est généralement produite dans des *chaudières*. La vaporisation d'un liquide peut être employée industriellement de deux autres manières.

— Pour concentrer un soluté donné par vaporisation du diluant. C'est le cas des *évaporateurs*.

— Pour refroidir un liquide ou un gaz récupérant les frigories produites par le liquide qui se vaporise. C'est le cas des *tours de réfrigération*.

En outre, le couplage entre transferts de matière et de chaleur peut être observé sans changement de phases dans le phénomène qu'est la *thermodiffusion*. Il est possible ainsi de récupérer de la chaleur bas niveau pour concentrer, voire séparer des mélanges gazeux ou liquides nécessitant l'utilisation de méthodes de séparation à haut niveau énergétique. Les centrales nucléaires conduisant à des productions notables d'énergie basse calorie (eau de refroidissement), il est probable que leur développement relance l'intérêt de telles méthodes de séparation.

Dans ce qui suit, à l'exception des colonnes thermodiffusionnelles et des chaudières développées par ailleurs, nous allons reprendre avec plus de détails l'étude des divers appareils cités précédemment. Pour chacun, nous nous efforcerons de donner une description générale avec les caractéristiques.

Échangeurs de chaleur

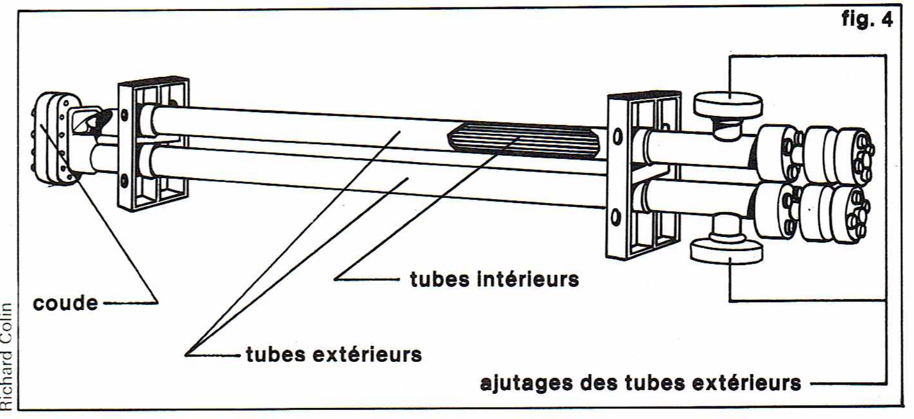
Description des appareils

* *Échangeurs double tube*

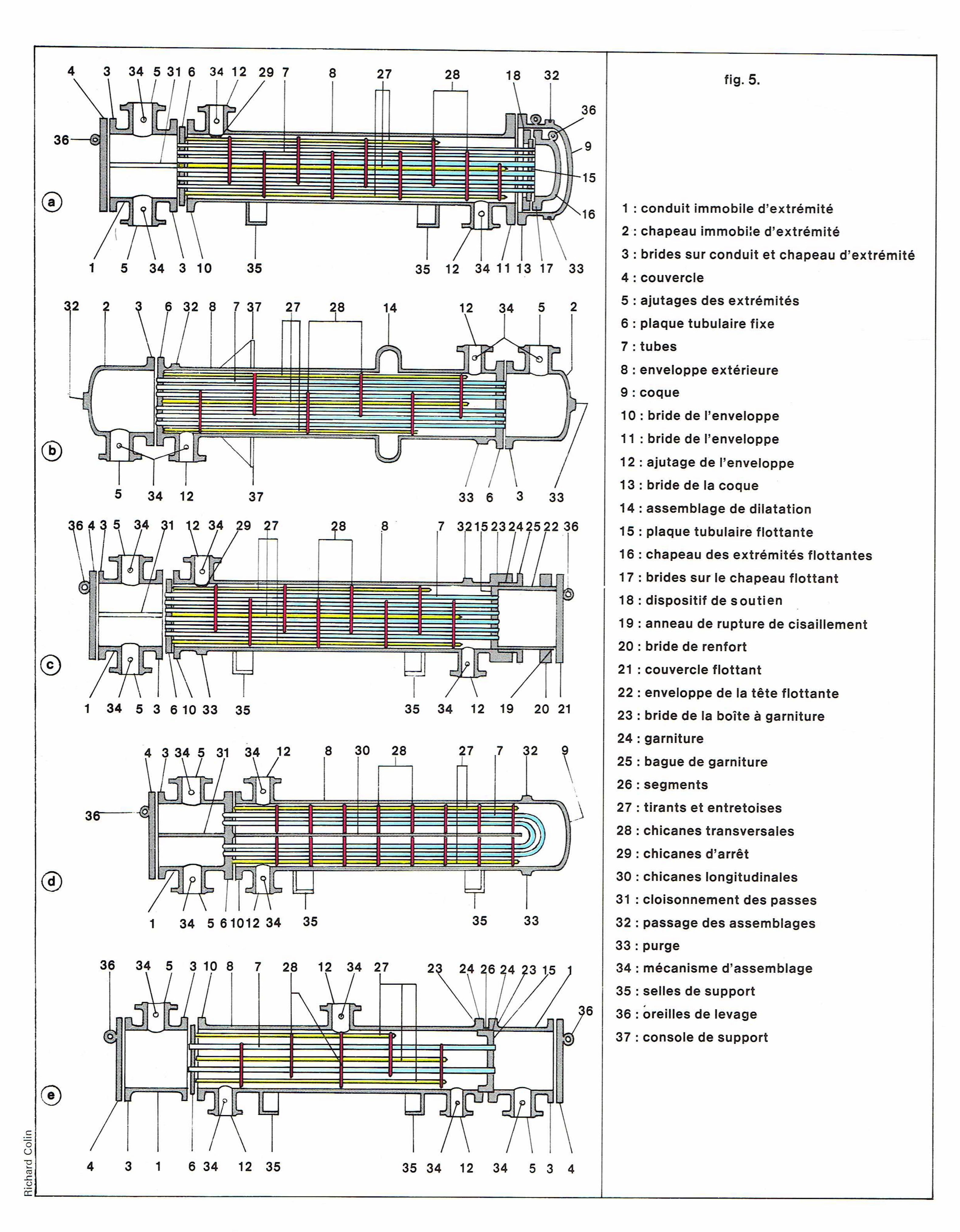
Ces échangeurs (*fig.* 4) sont constitués par des éléments rectilignes de deux tubes parallèles raccordés à leurs extrémités par des coudes. Les divers éléments sont tous assemblés par des raccords à démontage rapide, et un remplacement des tubes est possible. Les problèmes de dilatation thermique entre le tube intérieur et le tube extérieur sont résolus par l'utilisation de presse-étoupe ou de joint torique.

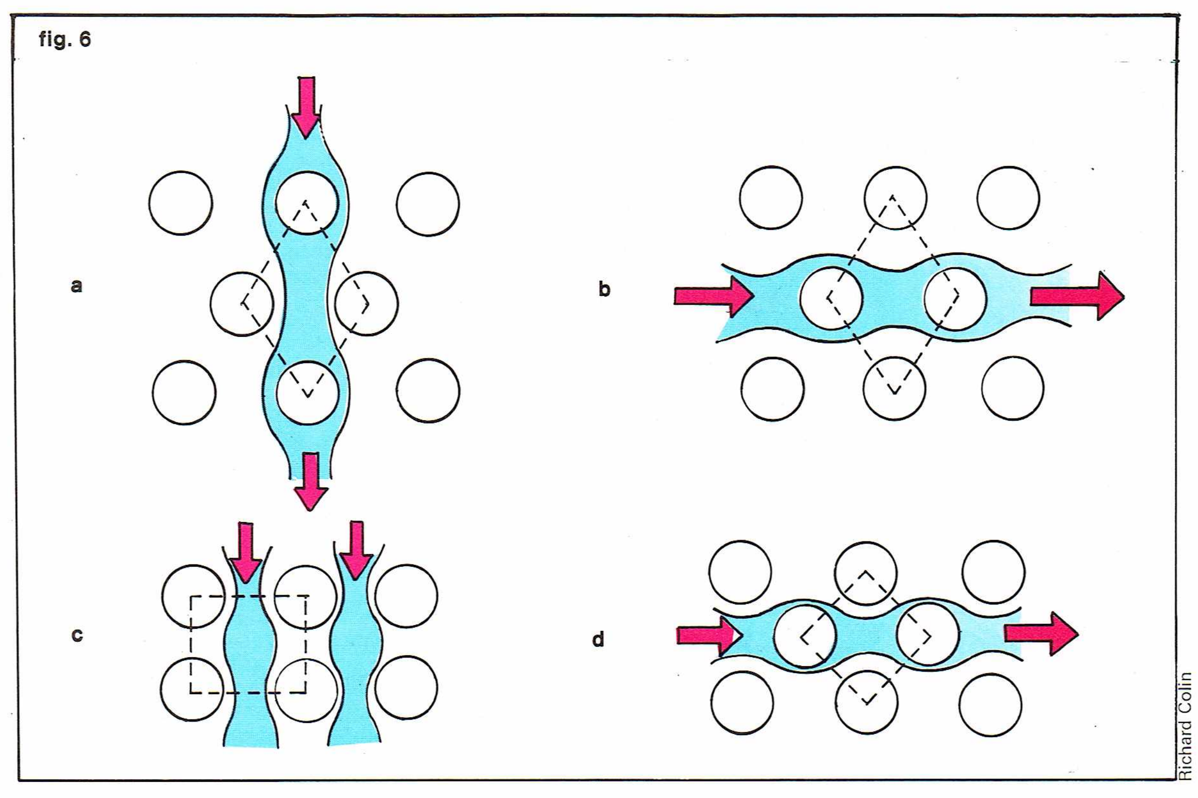
Les tubes sont généralement en acier de caractéristique I.P.S. et schédule 40, et les longueurs courantes sont de 3,6, 4,5, ou 6 m. On utilise également quelquefois des tubes en verre et en graphite. Un certain nombre d'associations des diamètres des tubes intérieurs et extérieurs a été préconisé par Kern (*Process Heat Transfer,* Mac Graw Hill, New York [1954]).

▼ ***Figure 4 : principe de l'échangeur double tube.***



Richard Colin


a
b
c
d
e
1 : conduit immobile d'extrémité
2 : chapeau immobile d'extrémité
3 : brides sur conduit et chapeau d'extrémité
4 : couvercle
5 : ajutages des extrémités
6 : plaque tubulaire fixe
7 : tubes
8 : enveloppe extérieure
9 : coque
10 : bride de l'enveloppe
11 : bride de l'enveloppe
12 : ajutage de l'enveloppe
13 : bride de la coque
14 : assemblage de dilatation
15 : plaque tubulaire flottante
16 : chapeau des extrémités flottantes
17 : brides sur le chapeau flottant
18 : dispositif de soutien
19 : anneau de rupture de cisaillement
20 : bride de renfort
21 : couvercle flottant
22 : enveloppe de la tête flottante
23 : bride de la boîte à garniture
24 : garniture
25 : bague de garniture
26 : segments
27 : tirants et entretoises
28 : chicanes transversales
29 : chicanes d'arrêt
30 : chicanes longitudinales
31 : cloisonnement des passes
32 : passage des assemblages
33 : purge
34 : mécanisme d'assemblage
35 : selles de support
36 : oreilles de levage
37 : console de support
Richard Colin
fig. 5.



◀ ***Figure 6 ; les quatre types d'écoulement des fluides entre les tubes d'un échangeur à faisceau et calandre en fonction de la disposition des tubes :*** a) ***disposition au pas triangulaire normal ;*** b) ***disposition au pas triangulaire renversé ;*** c) ***disposition au pas carré normal ;*** d) ***disposition au pas carré renversé.***

Ces appareils sont intéressants pour les facilités qu'ils offrent au point de vue du démontage et de l'entretien. Ils peuvent fonctionner à contre-courant pur, ce qui permet d'obtenir de bons rendements. Par contre, ils présentent les inconvénients suivants : risque de fuites aux raccords ; flexion du tube intérieur si la longueur est importante ; surface d'échange faible pour le volume global de l'appareil par suite du rayon minimal des coudes reliant les longueurs droites des tubes.

Ces échangeurs utilisés depuis l'origine conviennent aux produits sales, pour des débits faibles, des températures et des pressions élevées.

* *Échangeurs à faisceau et calandre*

Ce type d'échangeur est de loin le plus répandu dans les industries de transformation de l'industrie chimique et pétrochimique. Un faisceau de tubes est situé à l'intérieur d'une calandre dans laquelle circule le deuxième fluide. Cette conception se retrouvera également dans les condenseurs, les rebouilleurs et les fours multitubulaires.

Le faisceau est monté entre deux plaques en communication avec des boîtes de distribution qui assurent la circulation du fluide à l'intérieur du faisceau, généralement en plusieurs passes. Le faisceau, muni de chicanes, est logé dans une calandre possédant des tubulures d'entrée et de sortie pour le deuxième fluide circulant à l'extérieur des tubes du faisceau. Le chemin de ce deuxième fluide est imposé par les chicanes.

Tous les éléments entrant dans la construction de ces échangeurs ont fait l'objet d'une normalisation publiée par la T. E. M. A. (Standard of Tubular Exchangers Manufacturers Association, 5th Edition, 1968), qui spécifie leurs caractéristiques mécaniques et thermiques pour diverses conditions de fonctionnement. Cette normalisation a complété le code plus général proposé par l'A. S. M. E. (American Society of Mechanical Engineers) sur les récipients à pression et ébullition. L'A. P. I. (American Petroleum Institute) a proposé des compléments à la normalisation T. E. M. A. et au code A. S. M. E. De plus, de nombreuses sociétés possèdent des codes spécifiques pour les échangeurs faisceau tubulaire-calandre commercialisés au point de vue de la spécificité, de la garantie et des tolérances.

Calandre. Elle est en général réalisée en acier au carbone. Aux deux extrémités (à l'exception des échangeurs en U et à tête flottante) sont soudées les brides qui portent le couvercle et la boîte de distribution. Les principaux types d'échangeurs à faisceau et calandre sont décrits dans les ouvrages généraux rappelés précédemment, et les schémas des principaux types sont reportés sur la *figure* 5 (d'après *Chemical Engineers' Handbook*).

Faisceau. Les tubes du faisceau forment une catégorie spéciale répondant à des spécifications très sévères normalisées selon le calibre B. W. G. (Birmingham Wire Gage). On utilise couramment des tubes 12, 14, 16, B. W. G. avec des longueurs de 2,4, 3,6, 4,8, 6 m. Le choix du matériau dépend de l'utilisation : — acier au carbone pour un usage courant ; — laiton amirauté pour les appareils travaillant avec de l'eau de mer ; — aciers alliés pour les produits corrosifs et les températures élevées ; — aluminium et cuivre pour les très basses températures.

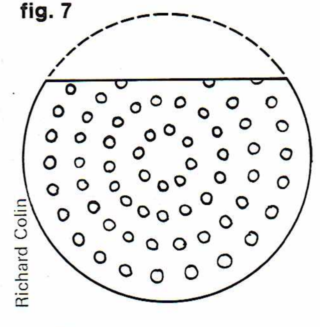
Les tubes sont fixés dans les plaques par mandrinage, et la perforation des trous dans les plaques est normalisée. Elle s'effectue selon une disposition, soit au pas triangle, soit au pas carré. Compte tenu de l'orientation du faisceau par rapport à la direction générale du fluide circulant dans la calandre, on obtient pour l'écoulement du fluide entre les tubes les quatre dispositions indiquées sur la *figure* 6.

Le pas triangulaire permet de placer environ 10 % de plus de tubes que le pas carré sur une plaque tubulaire de diamètre donné, mais, en contrepartie, la disposition des tubes rend difficile le nettoyage par insertion de grattoirs dans le faisceau. Pour ces appareils, il faut avoir recours à un nettoyage chimique et réserver leur emploi à des fluides propres. Pour des fluides susceptibles de conduire rapidement à des dépôts, on utilisera des dispositions à pas carré.

Le faisceau tubulaire est généralement muni de chicanes transversales qui ont pour but d'allonger le chemin du fluide circulant dans la calandre et d'améliorer le transfert par une augmentation de la vitesse du fluide. Les chicanes sont souvent constituées par un disque de diamètre légèrement inférieur à celui de la calandre, comportant une section libre représentant 20 à 45 % de la section totale (*fig.* 7).

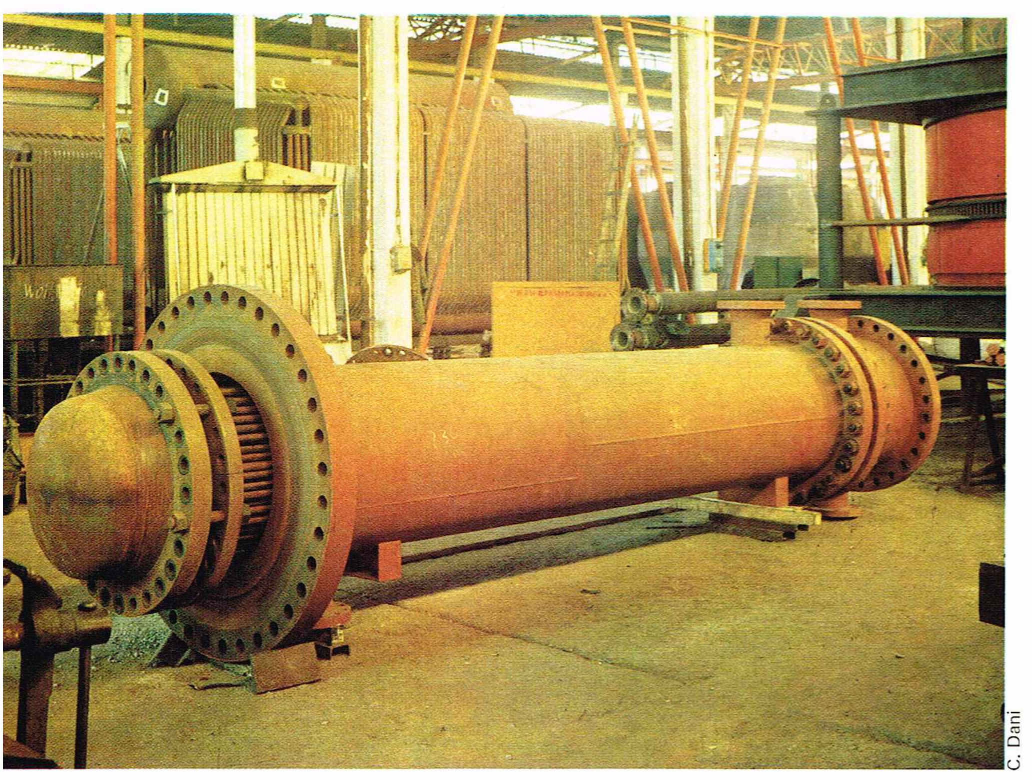
La section libre de la chicane et l'espacement entre deux chicanes sont pratiquement normalisés. L'espacement conditionne directement la vitesse du fluide, et il est compris entre D_c et $D_c/5$ où D_c est le diamètre de la calandre. Les chicanes assurent en outre la rigidité du faisceau.

L'alimentation du fluide dans le faisceau est obtenue par l'adjonction d'une boîte de distribution portant des brides d'entrée et de sortie, et d'une boîte de retour. La disposition de ces boîtes permet au fluide de traverser successivement plusieurs sections du faisceau, ce qui a



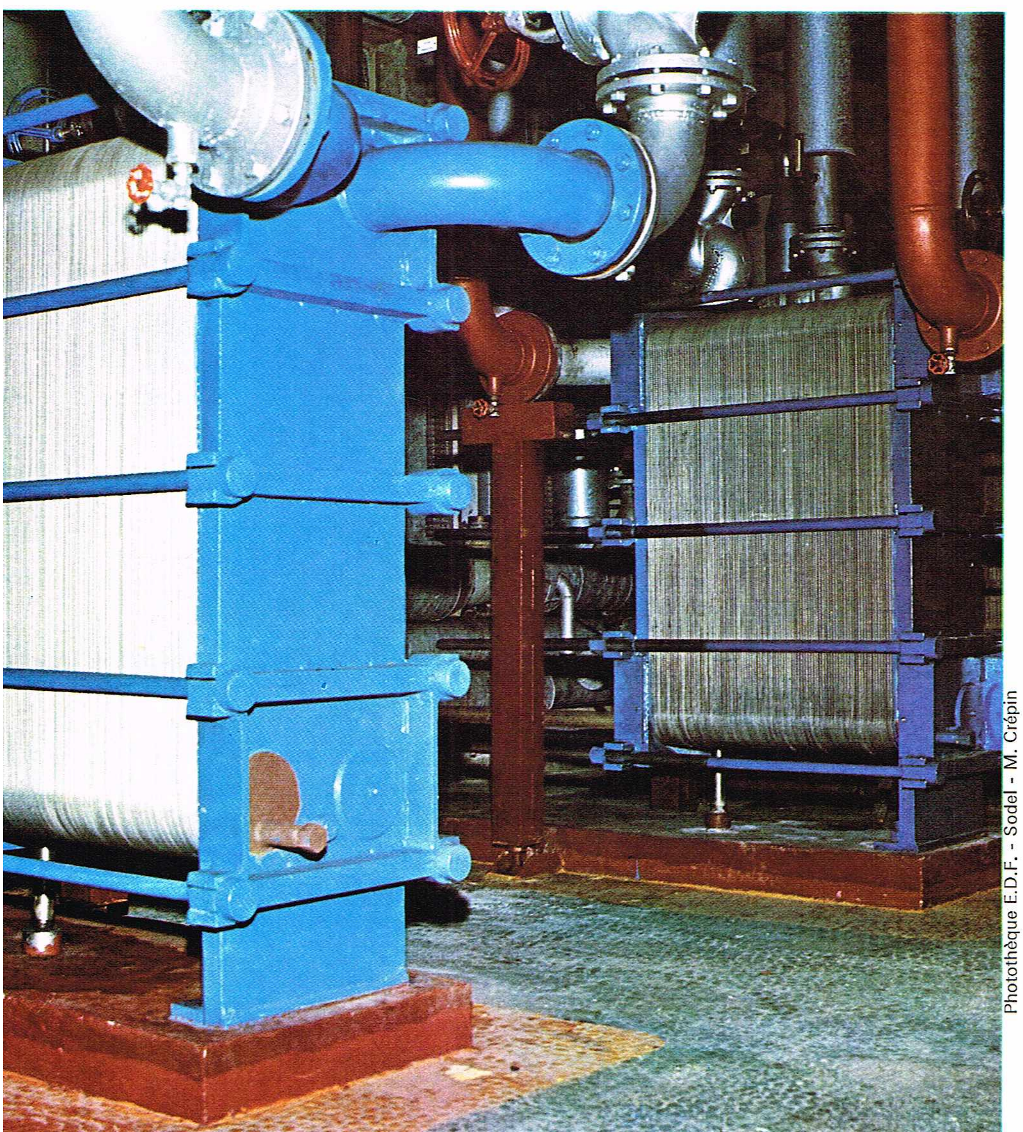
▲ ***Figure 7 : schéma d'une chicane de faisceau tubulaire.***

◀ ***Page ci-contre, figure 5 : les principaux types d'échangeurs à faisceau et calandre :*** a) ***échangeur à tête flottante interne ;*** b) ***échangeur à plaques tubulaires fixes ;*** c) ***échangeur à tête flottante externe ;*** d) ***échangeur à tubes en U ;*** e) ***échangeur à tête flottante externe avec anneau et bague de garniture.***



▲ **Un échangeur à tête flottante interne :** ***ce type d'échangeur est très utilisé dans l'industrie pétrochimique.***

▼ **Un échangeur à plaques planes *utilisé dans l'installation de chauffage par géothermie de la ZUP de Melun (France).***



pour but d'accroître la vitesse du fluide et d'augmenter le coefficient de transfert à l'intérieur des tubes. Cette disposition correspond toujours à un nombre pair de passages (ou passes) dans le faisceau. Compte tenu de l'espacement nécessaire aux portées de joint et au tirant, le nombre de tubes du faisceau en fonction du diamètre de la calandre, du nombre de passes dans le faisceau, du diamètre des tubes et de leur disposition peut être prévu, et Kern (*Process Heat Transfer,* Mac Graw Hill, New York [1954]) a donné des tableaux résumant les résultats obtenus.

Sur la *figure* 5 sont reportés également les principaux assemblages possibles pour le faisceau et la calandre.

Pour les *échangeurs tubulaires à plaques fixes,* les plaques fixes sont soudées directement à la calandre. Ces échangeurs peu onéreux ne peuvent être utilisés que si la différence de température entre les fluides chaud et froid est suffisamment faible pour que la dilatation ou la contraction du faisceau soit faible. En outre, le nettoyage de l'extérieur des tubes ne peut s'effectuer que par voie chimique.

Dans les *échangeurs à tête flottante,* l'une des plaques du faisceau est fixe, puisque bloquée entre les brides de la calandre et de la boîte de distribution. La deuxième plaque, de diamètre inférieur, porte la boîte de retour et peut coulisser librement à l'intérieur du capot qui ferme la calandre. Ces appareils permettent l'expansion thermique ainsi qu'un nettoyage mécanique de la surface externe du tube. La plupart des échangeurs faisceau-calandre utilisés dans l'industrie pétrochimique sont de ce type.

Les *échangeurs en U* permettent de supprimer la deuxième plaque tubulaire tout en conservant la propriété d'expansion de la tête flottante. L'économie ainsi réalisée lors de la construction est compensée par l'impossibilité d'un nettoyage mécanique interne des tubes et par la réduction du nombre de tubes placés dans une calandre de diamètre donné par suite de l'existence de coudes à 180°. Le faisceau présente généralement un espace libre au centre.

* *Autres types d'échangeurs*

Deux autres types d'échangeurs sont également utilisés de manière industrielle, d'une part les échangeurs à plaques, et d'autre part les échangeurs utilisant comme fluide réfrigérant l'air ambiant.

● *Les échangeurs à plaques*

Les échangeurs à plaques se présentent sous diverses formes : — les échangeurs à plaques hélicoïdales; — les échangeurs à plaques planes; — les échangeurs à plaques munies d'ailettes; — les échangeurs à tubes munis d'ailettes.

Dans tous ces appareils, les surfaces d'échange, pour un encombrement géométrique donné, sont très supérieures à celles des échangeurs à faisceau et calandre. En outre, comme nous le verrons plus loin, les écoulements secondaires et les pertes de charge correspondantes sont éliminés, ainsi que les problèmes de court-circuit et de dilatation différentielle. Cependant, la réalisation de ces échangeurs est beaucoup plus délicate et très onéreuse, et jusqu'à présent ils ne sont utilisés que pour des échanges ne nécessitant pas en valeur absolue de très grandes surfaces d'échange.

Les *échangeurs à plaques hélicoïdales* sont formés par une paire de plaques enroulées selon une hélice délimitant deux espaces annulaires rectangulaires où les fluides s'écoulent à contre-courant. Ce type d'échangeur peut être très compact. Ainsi, un échangeur de 1 m de diamètre, de 1,5 m de long, avec une spirale de 30 m, conduit à une surface d'échange de 100 m². On peut nettoyer les espaces annulaires en enlevant leur couvercle. Ces échangeurs sont réalisés en acier inoxydable, en inconel et en nickel.

Les *échangeurs à plaques planes* sont constitués de plaques disposées sur un bâti selon une disposition voisine des plaques des filtres presse. Les pertes de charge sont faibles et les courants secondaires de fluide impossibles. Les plaques d'échange sont désormais standardisées et elles sont réalisées en acier inoxydable, en inconel, en nickel, mais également en bronze et en cupronickel. De tels échangeurs peuvent être très polyvalents, et on peut en particulier faire circuler des fluides de grande viscosité. On ne peut cependant pas dépasser des pressions supérieures à 30 atmosphères et des températures supérieures à 150 °C. Par rapport à un échangeur à faisceau en acier

inoxydable, les échangeurs à plaques construits dans le même matériau et à surfaces d'échange identiques sont moins onéreux. Un échangeur ayant des plaques carrées de 0,85 m d'arête, de 3,80 m de long et comportant 416 plaques permet une surface d'échange maximale de 440 m².

Les *échangeurs à plaques fines* sont formés à partir de tôle emboutie entre deux plaques planes soudées aux deux extrémités, avec des rainures permettant le passage des fluides. Ces échangeurs se sont développés durant la dernière guerre mondiale pour des échanges thermiques à basses températures nécessités lors du fractionnement des mélanges gazeux. La pression ne peut pas dépasser 50 atm à 35 °C. Les plaques sont généralement réalisées en aluminium et leur association constitue un échangeur économiquement rentable lorsque les surfaces d'échange deviennent supérieures à 370 m².

Dans les *échangeurs tubulaires ailetés*, des ailettes planes soudées sur les tubes cylindriques permettent d'augmenter le rapport de la surface externe du tube à la surface interne d'un facteur allant de 1 à 40.

Signalons enfin l'existence d'*échangeurs à blocs de graphite*. Chaque bloc de graphite est percé de rangées de trous traversés de manière adéquate par le fluide chaud et le fluide froid. L'association de plusieurs blocs permet l'obtention d'échangeurs très performants.

● *Les échangeurs refroidis par une circulation forcée d'air*

Le refroidissement d'un fluide chaud par l'air ambiant s'est développé considérablement depuis 1960, et, pour refroidir un fluide, on s'oriente de plus en plus vers cette solution.

L'air ambiant traverse avec une grande vitesse des tubes munis d'ailettes à travers lesquels circule le fluide que l'on veut refroidir. Le faisceau est généralement constitué de tubes de 1,5 cm de diamètre extérieur munis d'ailettes de 1,25 à 1,50 cm de hauteur, l'espacement entre les ailettes étant tel que le rapport entre la surface des ailettes et celle du tube soit de 7 à 20. La longueur des tubes varie de 2,4 à 9 m et la largeur du faisceau de 1,20 à 3,60 m. Le faisceau peut comporter jusqu'à 30 rangées de tubes placées les unes au-dessus des autres. L'écoulement de l'air à travers ces rangées de tubes est obtenu à l'aide d'une hélice composée de 4 à 6 pales, et le débit d'air peut être modulé en modifiant la vitesse de rotation et l'orientation des pales. Dans certains cas, ces modifications sont réalisées automatiquement, ce qui permet d'adapter le débit d'air aux variations de température de l'air extérieur. L'air aspiré par l'hélice est distribué sur les rangées de tubes par l'intermédiaire d'une chambre dont la hauteur est supérieure au rayon de l'hélice. La vitesse d'aspiration de l'air est de l'ordre de 5 à 10 m/s. Autour de l'hélice se trouve une couronne dont la hauteur joue un rôle important sur la vitesse de l'air. L'hélice d'aspiration peut être située au-dessus ou en dessous du faisceau aileté. Lorsqu'elle est située en dessous, pour un débit de gaz identique, la puissance consommée est plus faible que pour la position supérieure dans la mesure où, le gaz étant plus froid, la densité est plus grande.

Un inconvénient non négligeable de ces échangeurs est le bruit provoqué par les hélices d'aspiration, que l'on peut cependant réduire en équipant l'ensemble de panneaux isolants ou en diminuant la vitesse de rotation des hélices.

Les échangeurs à plaques et à refroidissement à air étant d'utilisation plus récente, il n'existe pas de normes et de codifications aussi précises que pour les échangeurs à calandre et à faisceau; en outre, par suite de leur très grande variété, il est difficile de proposer des théories et des corrélations générales. Aussi, nous allons nous limiter, dans ce qui suit, à rappeler des méthodes de calcul élaborées dans le cas des échangeurs double tube et à faisceau et calandre, échangeurs dont les constructions sont standardisées à l'échelle internationale.

Calcul des échangeurs

Le but d'un échangeur est de récupérer une certaine quantité de chaleur dans des conditions économiques optimales, qui sont un compromis entre les frais d'investissement et les frais de fonctionnement. La dualité transfert de chaleur-perte de charge est à la base de tout calcul d'échangeur de chaleur. En effet, les résistances au transfert thermique sont d'autant plus faibles que les vitesses locales d'écoulement du fluide seront plus élevées. Dans ces conditions, on pourra utiliser des surfaces d'échange plus réduites (diminution de l'investissement), mais, les pertes de charge étant plus grandes, la pompe de circulation devra être plus puissante, ce qui entraînera une augmentation du prix de fonctionnement. Aussi, l'obtention des conditions optimales de fonctionnement d'un échangeur ne peut se concevoir sans une étude en parallèle du transfert de chaleur et de la perte de charge dans l'échangeur.

En outre, les fluides circulant à l'intérieur et à l'extérieur des tubes ne sont pas obligatoirement propres et un encrassement des surfaces se produit dans le temps. La formation de ces dépôts, généralement mauvais conducteurs de la chaleur, augmente les résistances au transfert thermique et conditionne la fréquence des arrêts pour nettoyage et entretien. Dans l'optimisation de l'échangeur, il faut tenir compte de ces variations du transfert thermique au cours du temps, et les conditions optimales de fonctionnement d'un échangeur usagé seront différentes de celles de l'échangeur neuf.

* *Étude du transfert de chaleur*

Quel que soit le type d'échangeur, si on ne tient compte que des conditions d'entrée et de sortie des deux fluides, le débit de chaleur transféré du fluide 1 (fluide chaud) au fluide 2 (fluide froid), en régime stationnaire et en l'absence de source de chaleur interne, s'écrit :

$$\text{(19)} \quad \Phi = m_1 Cp_1 (T_{1E} - T_{1S}) = m_2 Cp_2 (T_{2S} - T_{2E})$$

m et *Cp* représentent les débits massiques et la capacité calorifique massique des fluides. Les indices E et S sont relatifs à l'entrée et à la sortie de chacun des fluides.

Comme dans la première partie, nous pouvons exprimer le débit transféré en fonction d'une force motrice (différence de température) Δt_m, d'où :

$$\text{(20)} \quad \Phi = \frac{\Omega}{\sum_{i=1}^{n} R_i} \Delta t_m = U\Omega\Delta t_m$$

Ω est la surface d'échange de l'appareil et U un coefficient de transfert global défini par rapport à la force motrice Δt_m. Pour un échangeur de géométrie donnée, Ω est connu mais les valeurs de U et Δt_m dépendent des caractéristiques de fonctionnement de l'appareil, et nous allons donner dans ce qui suit les expressions de Δt_m et U pour les caractéristiques de fonctionnement relatives aux échangeurs double tube et à faisceau et calandre.

● *Différence de température moyenne Δt_m*

La différence de température moyenne va dépendre de la nature des deux fluides, de leur débit, mais également de leur sens d'écoulement. Dans le cas des échangeurs à double tube, les écoulements des fluides peuvent être soit à co-courant, soit à contre-courant (*fig.* 8a et b).

En supposant constant le coefficient de transfert global entre les deux extrémités de l'échangeur, un bilan thermique dans l'échangeur permet de montrer que :

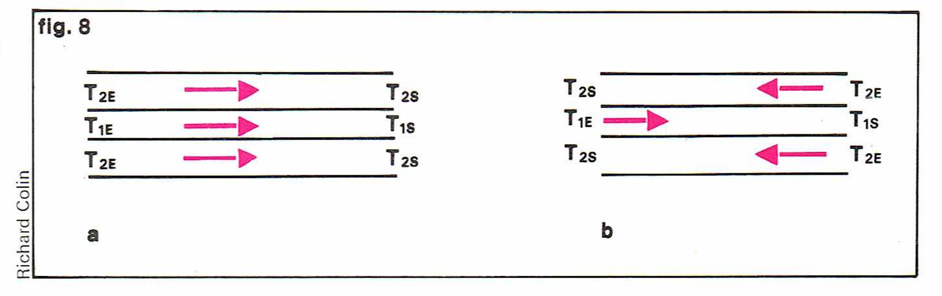
$$\text{(21)} \quad \Phi = U\Omega \text{ (DTML)}$$

DTML représente la moyenne logarithmique des différences de températures aux deux extrémités, soit :

$$\text{(22)} \quad \text{DTML} = \frac{(\Delta t)_0 - (\Delta t)_L}{\text{Log} \dfrac{(\Delta t)_0}{(\Delta t)_L}}$$

Échangeur à contre-courant	Échangeur à co-courant
$(\Delta t)_0 = T_{1E} - T_{2S}$	$(\Delta t)_0 = T_{1E} - T_{2E}$
$(\Delta t)_L = T_{1S} - T_{2E}$	$(\Delta t)_L = T_{1S} - T_{2S}$

Bien que la formulation soit identique pour les deux associations, pour des températures d'entrée ou de sortie



▼ ***Figure 8 : représentation schématique des écoulements de fluides dans le cas des échangeurs double tube ;***
a) *écoulement à co-courant*
b) *écoulement à contre-courant.*

des fluides identiques l'association à contre-courant conduit à des débits échangés très supérieurs à ceux obtenus avec une association à co-courant.

Les relations **(21)** et **(22)** établies dans le cas des échangeurs double tube ne peuvent pas être appliquées directement au cas des échangeurs à faisceau et calandre. La différence de températures à utiliser a été présentée sous sa forme définitive par Nayle, Bowman et Mueller (*Trans. Am. Soc., Mech. Engrs.*, 62, 283 [1940]). La différence de températures moyenne s'obtient en multipliant la DTML relative aux deux extrémités par un facteur correctif F qui dépend de deux coefficients E et R :

— le coefficient $E = \frac{T_{2S} - T_{2E}}{T_{1E} - T_{2E}}$ représente le rendement de l'échange puisque la limite supérieure de la température de sortie du fluide froid est égale à la température d'entrée du fluide chaud ;

— le coefficient $R = \frac{T_{1E} - T_{1S}}{T_{2S} - T_{2E}}$ représente, pour un fonctionnement adiabatique global de l'échangeur, le rapport $\frac{m_2 Cp_2}{m_1 Cp_1}$ et en première approximation le rapport des débits massiques des deux fluides, puisque, dans de nombreux cas, les capacités calorifiques massiques des fluides sont voisines.

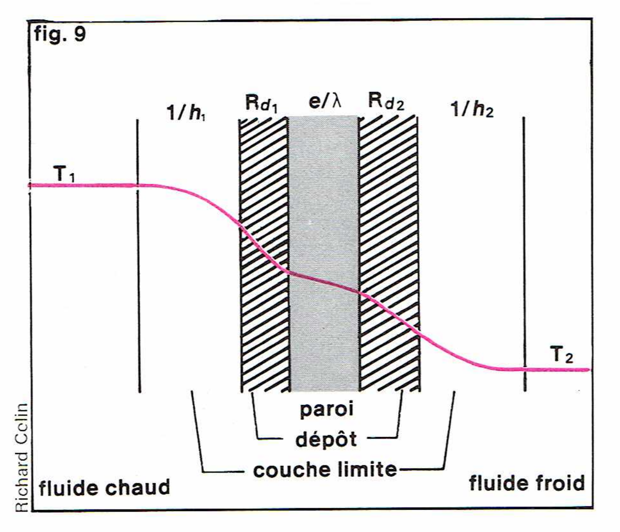
Le facteur correctif F a été obtenu par les auteurs précédents, et, dans la plupart des ouvrages indiqués dans la première partie, on trouve des courbes donnant F en fonction de E et R pour divers types de fonctionnement des échangeurs à faisceau et calandre. Dans tous ces calculs, les écoulements des fluides sont supposés soit à co-courant, soit à contre-courant. Si dans l'échangeur les écoulements sont à courants croisés, on introduit encore un facteur F dépendant des paramètres E et R et mesurant l'efficacité de l'appareil par rapport à un contre-courant pur. Nous ne donnerons pas ici les différentes expressions du facteur correctif F.

Signalons enfin que, pour certaines caractéristiques de fonctionnement, la température de sortie du fluide froid peut devenir supérieure à la température de sortie du fluide chaud. Le facteur correctif F diminue alors considérablement, et il est nécessaire dans tous les cas d'éviter le croisement des températures de sortie. On y parvient généralement en augmentant le nombre de passes côté calandre, et on s'efforce toujours, dans la pratique, d'obtenir un facteur correctif F supérieur à 0,75.

● *Coefficient de transfert global* U

L'étude du transfert de chaleur entre le fluide chaud et le fluide froid au travers de la paroi fait apparaître dans le cas le plus général cinq résistances de transfert schématisées sur la *figure* 9 : $R_1 = 1/h_1$ est la résistance de transfert par convection dans le fluide chaud. R_{d1} est la résistance de transfert par conduction dans le dépôt d'encrassement côté fluide chaud. $R_2 = 1/h_2$ est la résistance de transfert par convection dans le fluide froid. R_{d2} est la résistance de transfert par conduction dans le dépôt d'encrassement côté fluide froid.

$R_p = e/\lambda$ est la résistance de transfert par conduction dans la paroi métallique.



▶ *Figure 9 : les cinq* **résistances de transfert** *lors de l'échange de chaleur entre un fluide chaud et un fluide froid au travers d'une paroi.*

Dans la plupart des cas, cette résistance est négligeable devant les autres résistances. C'est ce que nous supposerons dans la suite des calculs.

Comme le débit de chaleur transféré fait apparaître une surface de transfert Ω, il est nécessaire de rapporter les résistances de transfert énumérées précédemment à une même surface. Dans les échangeurs industriels, quel que soit leur type, le fluide chaud circule à l'intérieur du tube, alors que le fluide froid circule à l'extérieur. Généralement, on convient de choisir en référence la surface extérieure du tube et de rapporter les autres résistances à cette même surface en multipliant les diverses résistances par le rapport correspondant des diamètres, d'où les nouvelles valeurs des résistances : R_1^*, R_{d1}^*, R_{d2}^*, R_2.

La résistance globale U_S est alors donnée par la relation :

$$\textbf{(23)} \qquad \frac{1}{U_S} = \frac{1}{h_2} + R_{d2}^* + R_{d1}^* + \frac{1}{h_1^*}$$

U_S représente le coefficient global de transfert du tube usagé (sale) par opposition au coefficient global de transfert U du tube neuf tel que :

$$\textbf{(24)} \qquad \frac{1}{U} = \frac{1}{h_2} + \frac{1}{h_1^*}$$

Le coefficient de transfert h_1 est évalué à l'aide d'une des corrélations présentées dans la première partie. Pour l'estimation des coefficients h_2, la plupart des auteurs sont d'accord pour une utilisation des relations établies lors des écoulements intérieurs, à condition toutefois d'apporter aux critères adimensionnels apparaissant dans les corrélations deux modifications principales : la première est relative au *« diamètre équivalent »* à utiliser dans les corrélations ; la seconde concerne l'évaluation du *« flux massique »* du fluide extérieur.

Pour les échangeurs double tube, la section annulaire étant constante, le flux massique s'obtient en divisant le débit massique par l'aire de la section annulaire comprise entre les deux tubes. Le diamètre équivalent, comme nous l'avons indiqué dans la première partie, est pris égal à 4 D_H, où D_H représente le diamètre hydraulique de l'espace annulaire :

$$\textbf{(25)} \qquad D_H = \frac{\text{volume du fluide}}{\text{surface mouillée par le fluide}}$$

Dans le cas des échangeurs à faisceau et calandre, le flux massique est beaucoup plus difficile à définir, car l'écoulement du fluide dans la calandre se fait avec des orientations et des vitesses différentes selon la disposition des chicanes. On peut distinguer grossièrement deux types de courants : — un courant principal qui s'écoule normalement au faisceau entre les chicanes et parallèlement au faisceau au voisinage des chicanes ; — de nombreux courants secondaires dus aux tolérances de la construction entre chicanes et calandre, entre tubes et chicanes et surtout entre faisceau et calandre.

Cependant, par suite de l'effort de normalisation, les auteurs ont pu, dans le cas de ces échangeurs, préciser les modifications à apporter sur les valeurs du diamètre équivalent et du flux massique. On distingue deux types principaux de modifications. Des auteurs, tel Donohue (*Ind. Eng. Chem.*, 41, II, 2499 [1949]), définissent deux débits massiques moyens, l'un longitudinal, l'autre transversal, et utilisent le diamètre extérieur des tubes comme diamètre équivalent. D'autres auteurs, parmi lesquels Kern (*Process Heat Transfer,* Mac Graw Hill Book, Inc., New York [1954]), définissent un seul débit moyen pour l'ensemble de l'appareil et introduisent un diamètre équivalent dépendant de la disposition des tubes.

Précisons quelque peu les deux types de modifications.

— *Méthode de Donohue :* Donohue prend en compte l'espacement entre chicanes pour définir un flux massique transversal G_T et la hauteur sous chicanes pour définir un flux massique longitudinal G_L. Le flux massique moyen à introduire dans les corrélations étant tel que :

$$\textbf{(26)} \qquad G = \sqrt{G_T G_L}$$

Le flux massique transversal est évalué en divisant le débit massique par l'aire maximale de passage du fluide relative à la section équatoriale de l'échangeur :

$$\textbf{(27)} \qquad G_T = \frac{m}{\Omega_T}$$

L'aire Ω_T varie selon l'arrangement des tubes entre deux chicanes, et on trouvera dans l'ouvrage de Wuithier des valeurs de Ω_T pour les différentes dispositions : pas normal carré ou triangulaire ; pas renversé carré ou triangulaire.

Le flux massique longitudinal est calculé en divisant le débit massique par une aire proportionnelle à la différence des aires de la section intérieure de la calandre et de la section des tubes. Le facteur de proportionnalité est égal au rapport de l'aire du secteur libre des chicanes à l'aire de la section intérieure de la calandre.

Connaissant G_T et G_L, pour des échangeurs où les tolérances de construction sont similaires, la formule pratique suivante préconisée par Bowman (A. S. M. E., *Miscellaneous Papers*, 1028, 75 [1936]) permet d'obtenir un bon ordre de grandeur du coefficient de transfert h_2 :

(28) $$\frac{h_2 d_2}{\lambda} = 0{,}22 \left(\frac{G d_2}{\mu}\right)^{0,6} \left(\frac{\mu C_p}{\lambda}\right)^{0,33} \left(\frac{\mu}{\mu_p}\right)^{0,14}$$

— *Méthode de Kern :* Kern tient compte de la disposition géométrique des tubes dans le faisceau pour définir un diamètre équivalent. Ainsi, p désignant le pas des tubes (distance entre les centres des tubes), le diamètre équivalent d_e est égal à :

(29) $$d_e = \frac{4\,p^2}{\pi d_2} - d_2 \quad \text{pour un pas carré}$$

(30) $$d_e = \frac{3{,}464\,p^2}{\pi d_2} - d_2 \text{ pour un pas triangulaire}$$

Constatant que, pour des chicanes normalisées, la hauteur de la section libre étant de l'ordre de 25 % du diamètre intérieur de la calandre, les flux massiques G_L et G_T sont du même ordre de grandeur, Kern se contente de calculer le flux transversal G_T ; le coefficient de transfert h_2 est obtenu à l'aide de la relation :

(31) $$\frac{h_2 d_e}{\lambda} = 0{,}36 \left(\frac{G_T d_e}{\mu}\right)^{0,55} \left(\frac{\mu C_p}{\lambda}\right)^{0,33} \left(\frac{\mu}{\mu_p}\right)^{0,14}$$

La relation **(31)** est valable pour des critères de Reynolds $\frac{G_T d_e}{\mu}$ supérieurs à 2 100.

Comme nous l'avons indiqué précédemment, on ne tient pas compte des résistances de transfert à l'intérieur de la paroi métallique, mais la valeur de la température de la paroi est nécessaire pour tenir compte du terme correctif relatif à la variation de la viscosité du fluide en fonction de la température. On l'obtient en écrivant l'égalité des flux transférés, soit :

$$h_2\,(t_2 - t_p) = h_1^*\,(t_p - t_1) \qquad \text{d'où :}$$

(32) $$t_p = \frac{h_2 t_2 + h_1^* t_1}{h_1^* + h_2}$$

Connaissant h_1 et h_2, il est donc alors possible de trouver la valeur de la résistance globale du tube propre. Après un certain temps d'utilisation, il peut se former à l'intérieur et à l'extérieur des tubes des dépôts qui augmentent la résistance globale de transfert. Le coefficient de transfert U_S sera par suite inférieur à celui du tube neuf mais, dans la plupart des cas, l'appareil sera calculé pour la valeur minimale du coefficient de transfert relative au tube sale. On convient de manière empirique qu'un échangeur doit fonctionner sans nettoyage durant une année et, dans la norme T. E. M. A., on trouve une liste des valeurs des résistances d'encrassement pour divers produits véhiculés dans les industries pétrochimiques.

Nous pouvons désormais calculer le coefficient de transfert global et le débit transféré dans l'échangeur en utilisant pour la différence de température moyenne la valeur DTML multipliée par le facteur correctif F. En réalité, le débit évalué ainsi n'est correct qu'à condition que le coefficient de transfert global U_S reste constant tout au long de l'échangeur. Cette hypothèse ne peut être qu'approchée puisque le coefficient de transfert dépend des propriétés physico-chimiques des fluides, lesquelles varient au cours de la traversée dans l'échangeur. Le débit de chaleur transféré peut être cependant toujours évalué à l'aide de la relation **(20)** à condition de prendre, comme le préconise Colburn, une valeur moyenne de U_S égale à la valeur du coefficient de transfert pour des températures moyennes des fluides chaud et froid T_{1C} et T_{2C}, appelées généralement températures calorifiques. Colburn (*Eng. Bull. Purdue Univ.*, 26, I, 84 [1942]) postule une variation linéaire du coefficient de transfert global en fonction de la température de l'un des fluides. Il définit ainsi deux coefficients de transfert global U_1 et U_2 et le débit de chaleur transféré est tel que :

(33) $$\Phi = \Omega\,\frac{U_2\,\Delta t_c - U_1\,\Delta t_f}{\text{Log}\,\dfrac{U_2\,\Delta t_c}{U_1\,\Delta t_f}}$$

(34) $$\text{avec} \quad \Delta t_c = T_{1E} - T_{2S} \quad \text{et} \quad \Delta t_f = T_{1S} - T_{2E}$$

Dans l'ouvrage de Wuithier, on trouvera les relations permettant d'évaluer à partir de U_1 et U_2 les valeurs des températures calorifiques. Ces dernières ne sont pas nécessaires pour le calcul du débit transféré mais, dans la mesure où elles correspondent aux conditions de températures moyennes des fluides dans l'appareil, elles permettent d'obtenir une valeur moyenne du critère de Reynolds caractéristique de la nature de l'écoulement des deux fluides dans l'échangeur.

★ *Étude des pertes de charge*

Les deux fluides traversant l'échangeur s'écoulent sous l'effet d'une différence de potentiel mesurée par la différence de pression totale entre l'entrée et la sortie appelée *perte de charge*. Cette perte de charge dépend de la vitesse, des propriétés physico-chimiques du fluide ainsi que de la géométrie de l'appareil. Les analogies entre le transfert de chaleur et de quantité de mouvement en régime stationnaire sont telles qu'à une augmentation du coefficient de transfert de chaleur correspond également une augmentation de la perte de charge. Industriellement, on essaie de limiter cette perte de charge à 1 atm pour des échangeurs fonctionnant au refoulement d'une pompe. En revanche, si l'écoulement est dû à la force de pesanteur, la perte de charge ne devra pas dépasser la pression hydrostatique à l'intérieur des tubes.

● *Perte de charge à l'intérieur des tubes*

En régime stationnaire, un bilan de quantité de mouvement dans une conduite cylindrique de longueur L permet de relier la perte de charge Δp au critère de Margoulis de quantité de mouvement (soit le facteur de frottement $f/2$), soit :

(35) $$\frac{\Delta p}{L} = \frac{f}{2} \cdot \frac{4\,G^2}{\rho d_1}$$

Dans tous les ouvrages généraux de mécanique des fluides, on trouve des expressions du facteur de frottement, à savoir :

— *en régime laminaire* $\left(\mathcal{R}e = \frac{G d_1}{\mu} < 2\,100\right)$, le facteur de frottement $f/2$ est donné par la relation de Poiseuille :

(36) $$f/2 = 64/\mathcal{R}e$$

— *en régime intermédiaire et turbulent* ($\mathcal{R}e > 2\,100$), il existe de très nombreuses corrélations semi-empiriques. Dans le cas des échangeurs de chaleur, on pourra utiliser les relations préconisées par Mac Adams (*Ind. Eng. Chem.*, 14, 105 [1922], *Trans. A.I. Ch. E.*, 28, 56 [1932]), soit :

— pour les tubes lisses :

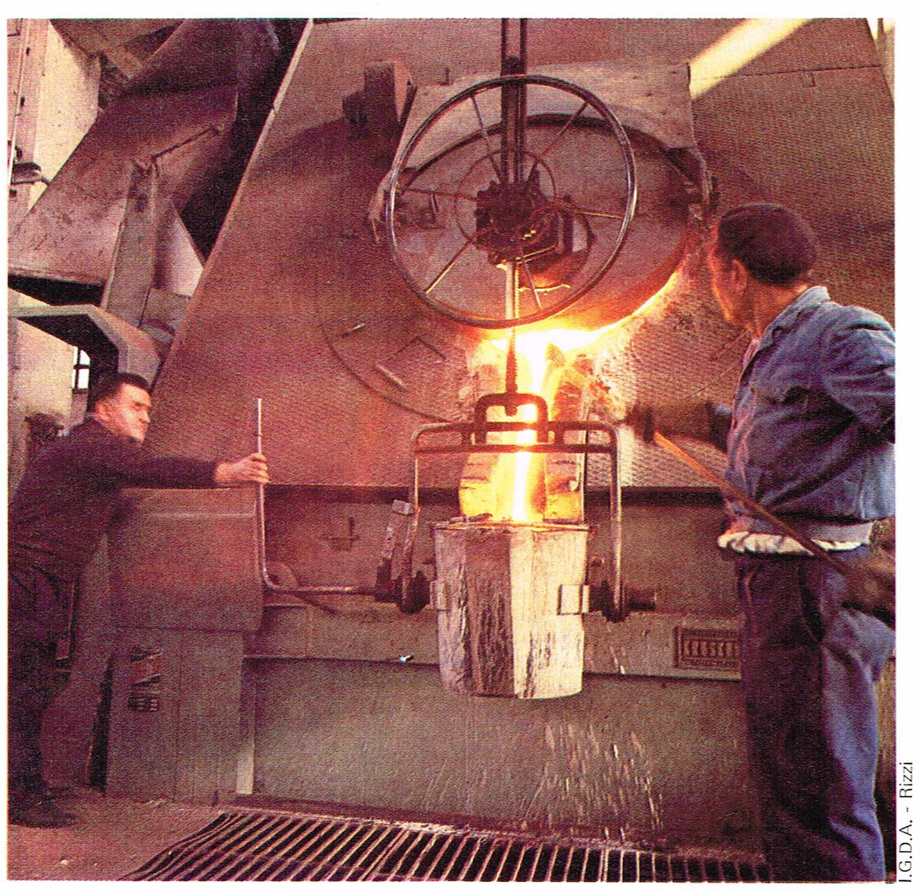
(37) $$f/2 = 0{,}000\,7 + 0{,}062\,5\;\mathcal{R}e^{-0,32}$$

— pour les tubes rugueux :

(38) $$f/2 = 0{,}001\,75 + 0{,}132\;\mathcal{R}e^{-0,42}$$

Pour tenir compte de la non-isothermicité de l'écoulement, Sieder et Tate (*Ind. Eng. Chem.*, 18, 1429 [1936]) proposent de multiplier le facteur $f/2$ obtenu à l'aide des relations précédentes par les rapports $\left(\frac{\mu_p}{\mu}\right)^{0,25}$ en régime d'écoulement laminaire et $\left(\frac{\mu_p}{\mu}\right)^{0,14}$ en régime d'écoulement turbulent.

Dans les échangeurs à double tube, les tubes intérieurs sont généralement rugueux, alors qu'à l'état neuf, les tubes des échangeurs à faisceau et calandre sont lisses. Dans ces derniers, il faudra ajouter à la perte de charge du fluide à l'intérieur des conduites celle observée dans les boîtes de distribution et de retour, ces pertes étant traduites essentiellement par une dégradation d'énergie cinétique.



I.G.D.A. - Rizzi

▲ *Transvasement d'une poche de coulée de métal d'un four électrique; les fours électriques utilisés en métallurgie réalisent la transformation de l'énergie électrique (provenant d'un arc électrique) en énergie thermique.*

- *Perte de charge à l'extérieur des tubes*

Pour les échangeurs double tube, on utilise les relations précédentes, à condition toutefois de remplacer le diamètre intervenant dans les différents critères par le diamètre équivalent $d_e = 4\ D_H$, D_H étant le diamètre hydraulique défini par la relation **(25)**.

Dans le cas des échangeurs du type faisceau et calandre, les pertes de charge résultent de l'écoulement principal et des écoulements secondaires dus aux jeux et aux tolérances entre les divers éléments de l'échangeur. Bell (*Petr. Eng.* 32, C 26 - C 40 [1960]) a proposé des méthodes numériques de calcul des pertes de charge où apparaissent les courants secondaires, mais ces calculs sur ordinateur ne se justifient que pour des calandres de faible diamètre. Comme pour le transfert de chaleur, Donohue et Kern ont publié, pour leur part, des méthodes de calcul négligeant les courants secondaires. Les résultats obtenus sont cependant en bon accord avec les valeurs expérimentales.

Donohue décompose le calcul en deux éléments :

— Δp_L, perte de charge longitudinale relative à l'espace libre des chicanes, assimilée à un orifice de coefficient 0,7, d'où :

(39) $$u_L = 0{,}7\sqrt{\frac{2\ \Delta p_L}{\rho}}$$

et $$\Delta p_L \# \frac{G_L^2}{\rho}$$

G_L est le flux massique longitudinal introduit précédemment.

— Δp_T, perte de charge transversale relative à l'écoulement normal du fluide au travers du faisceau entre deux chicanes. En introduisant le critère de Reynolds :

(40) $$\mathcal{R}e_T = \frac{G_T d_2}{\mu}$$

où G_T est le flux massique transversal, le facteur de frottement $f_{T/2}$ correspondant à cet écoulement est donné en fonction du pas p de la disposition géométrique des tubes du faisceau par les relations :

(41) $$f_{T/2} = \frac{7{,}5\ d_2}{(p - d_2)\ \mathcal{R}e_T} \quad \text{pour } \mathcal{R}e_T < 2\,100$$

(42) $$f_{T/2} = 0{,}375\left[\frac{d_2}{(p - d_2)\ \mathcal{R}e_T}\right]^{0,2} \quad \text{pour } \mathcal{R}e_T > 2100$$

Le courant transversal rencontre N rangées horizontales de tubes, situées entre la section libre des chicanes et de la calandre; si D_C est le diamètre de la calandre et H la hauteur de la section libre des chicanes, le nombre de rangées est : $\dfrac{D_C - H}{p}$, et la perte de charge transversale entre deux chicanes est :

(43) $$\Delta p_T = N f_{T/2}\ 4\ G_T^2$$

Si N_c représente le nombre de chicanes dans l'échangeur, la perte de charge totale est égale à :

$$\Delta p = N_c\ \Delta p_L + (N_c + 1)\ \Delta p_T \quad \text{soit :}$$

(44) $$\Delta p = \frac{1}{\rho}\left[N_c G_L^2 + 4\ (N_c + 1)\left(\frac{D_C - H}{p}\right) f_{T/2} G_T^2\right]$$

La perte de charge ainsi calculée ne tenant pas compte des propriétés physiques en fonction de la température, on peut corriger le résultat obtenu en le multipliant par le rapport $\left(\dfrac{\mu_p}{\mu}\right)^{0,14}$.

Dans son analyse, Kern suppose, pour les échangeurs normalisés, l'égalité des flux massiques G_L et G_T, et caractérise l'écoulement du fluide dans l'échangeur à l'aide d'un seul critère de Reynolds :

(45) $$\mathcal{R}e_K = \frac{G_T d_e}{\mu}$$

où le diamètre équivalent dépendant de la disposition des tubes dans le faisceau est donné par les relations **(29)** et **(30)**. Le facteur de frottement étant calculé par des relations analogues aux relations **(41)** et **(42)**, la perte de charge globale dans l'échangeur est telle que :

$$\Delta p = 4\ f_{T/2}\frac{G_T^2\ (N_c + 1)\ D_C}{\rho d_e}$$

Ici encore, on devra multiplier le résultat obtenu par le terme collectif $\left(\dfrac{\mu_p}{\mu}\right)^{0,14}$ pour tenir compte des variations des propriétés physico-chimiques du fluide en fonction de la température.

Sachant, désormais, évaluer le transfert de chaleur et la perte de charge dans les échangeurs double tube et à faisceau et calandre, il est possible d'envisager leur étude économique. Nous n'en parlerons pas ici, mais on pourra trouver ces aspects dans les ouvrages généraux indiqués précédemment.

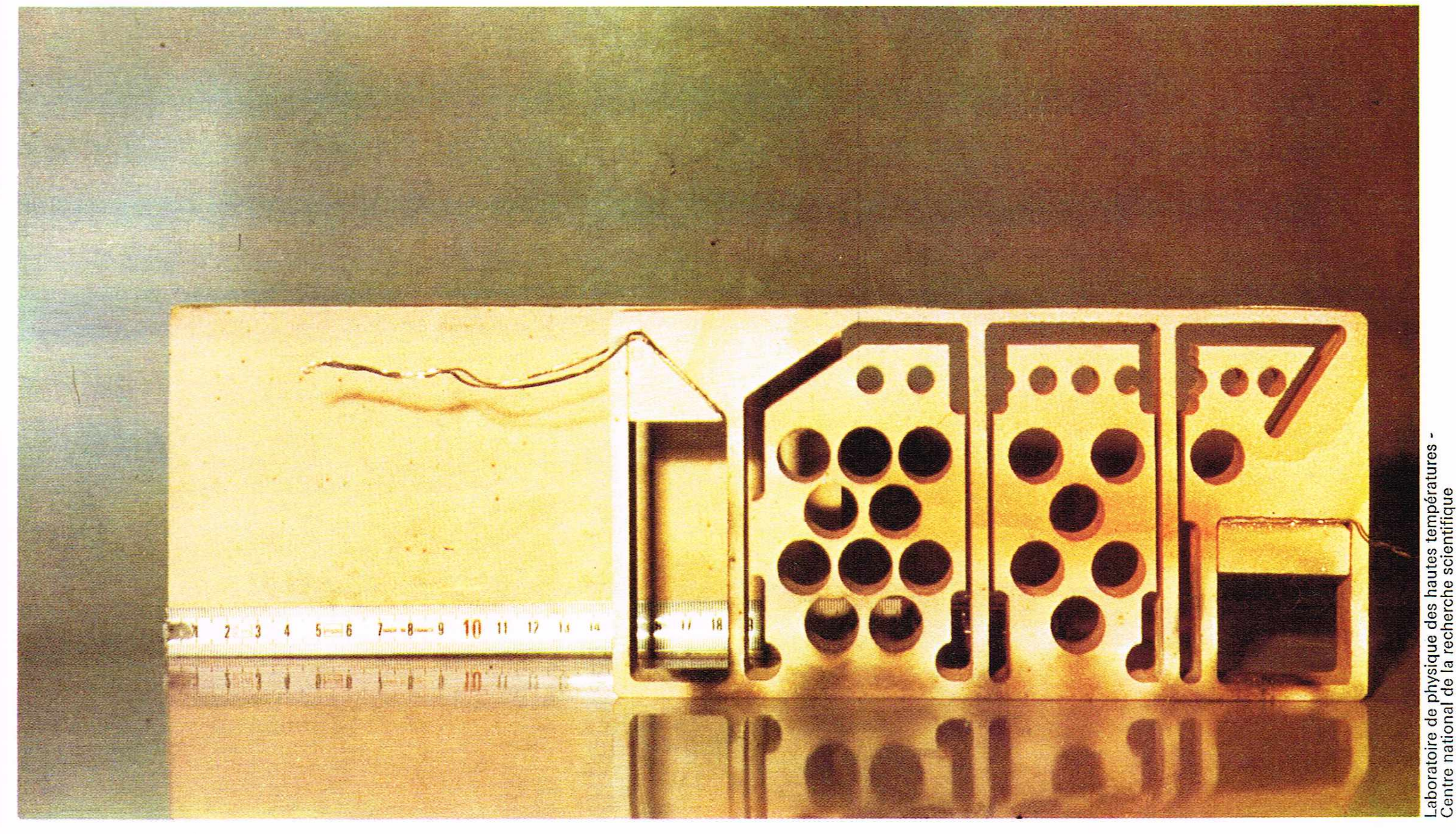
Fours

Introduction

On peut classer globalement les fours industriels en deux grandes familles : d'une part les fours électriques, et d'autre part les fours à combustion.

Pour les fours électriques, à l'exception des fours de laboratoire, la source de chaleur est obtenue par l'intermédiaire d'un arc électrique entre une anode et une cathode convenablement choisies, permettant l'obtention de températures élevées sans la présence de constituants gazeux nuisibles à la transformation envisagée. De tels fours sont utilisés en métallurgie pour les affinages et les réductions électrochimiques des métaux et des oxydes réfractaires. C'est un procédé généralement coûteux qui n'a d'intérêt que dans la mesure où un four plus classique à combustion n'est pas envisageable. Nous n'aborderons pas ici l'étude de ces fours où l'énergie électrique est transformée en énergie thermique.

Nous allons nous limiter exclusivement aux fours pour lesquels la chaleur est produite par combustion. La combustion peut s'effectuer dans un foyer utilisant du coke ou de la houille finement pulvérisée ou dans des brûleurs à fuel et à gaz. Suivant les capacités et les utilisations des fours, les trois types de combustibles sont concurremment employés mais nous ne traiterons pas ici l'étude des foyers et des brûleurs dont les conceptions jouent un rôle essentiel dans le rendement énergétique global des fours. Signalons que l'utilisation des brûleurs à fuel ou à gaz paraît indispensable si l'on souhaite faire varier rapidement le débit de chaleur produit. Il en est ainsi lorsque le récepteur est constitué par un mélange réactionnel fortement endo- ou exothermique.



Laboratoire de physique des hautes températures - Centre national de la recherche scientifique

▲ ***Les parois intérieures des fours sont recouvertes de briques ou de ciments réfractaires permettant d'éviter les échanges par rayonnement tout en limitant les pertes thermiques par conduction avec l'extérieur. Ici, une brique réfractaire utilisée dans le four de 2 200 °C en atmosphère oxydante du Laboratoire de physique des hautes températures à Orléans (Brevet C. N. R. S.-ANVAR).***

Le débit de chaleur produit par combustion est transmis par rayonnement, convection et conduction au récepteur constitué généralement par un faisceau tubulaire où circule le fluide froid. Parmi les fours industriels à combustion, ceux de ce type, de loin le plus important, portent le nom de *fours tubulaires*. Leur conception dépend fortement de leurs utilisations, dont les principales sont :
— le chauffage d'un fluide sans changement de phase ;
— le chauffage d'un liquide avec vaporisation partielle et totale (cas des chaudières) ;
— le chauffage d'un mélange réactionnel endothermique traversant un serpentin.

La chaleur de combustion n'est pas utilisée en totalité par le fluide circulant à l'intérieur du récepteur. Une partie, généralement faible, est perdue par les parois du four, et une autre, plus importante, est évacuée vers le milieu extérieur par les fumées circulant dans une cheminée. Les gaz quittant le four étant à des températures élevées, on utilise dans certains cas cette chaleur pour préchauffer d'autres fluides ou l'air d'alimentation. Cependant, il est nécessaire que la température des fumées ne soit pas trop abaissée pour avoir un bon tirage de la cheminée ; en effet, un bon tirage de la cheminée crée une dépression à l'intérieur du four, facilitant ainsi l'admission d'air dans les brûleurs.

Le rendement du four représentant la fraction de l'énergie libérée par la combustion et absorbée par le récepteur, la conception actuelle des fours tubulaires est telle que le transfert de chaleur entre le foyer et le faisceau se fait dans son intégralité par rayonnement. Dans les fours plus anciens, seule la première et la deuxième rangée des tubes du faisceau étaient accessibles au rayonnement thermique, le transfert avec les autres rangées se faisant uniquement par convection.

Description des fours à combustion tubulaires

★ Description générale

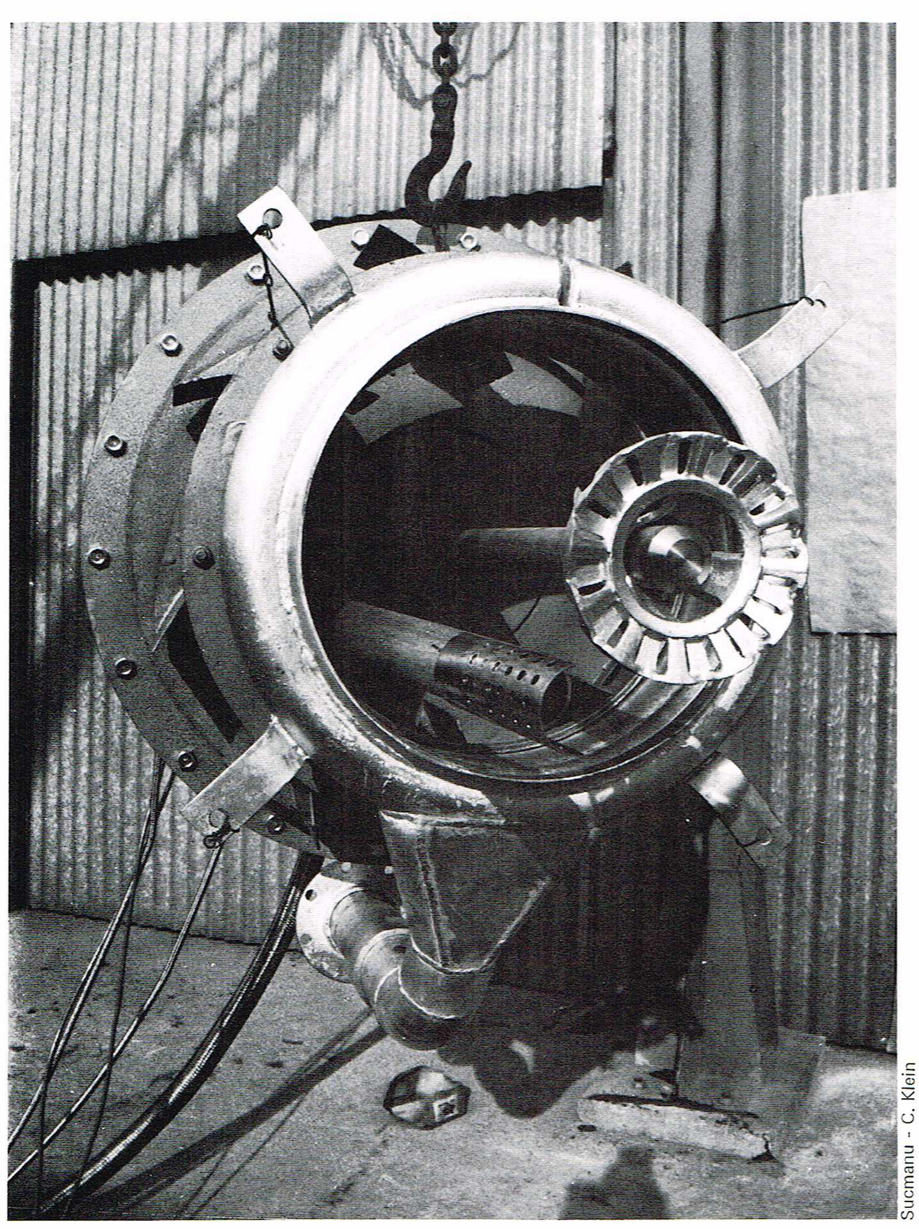
L'enceinte extérieure est constituée d'une enveloppe métallique parallélépipédique ou cylindrique. Le four comprend une zone de radiation correspondant à la zone où se développent les flammes de combustion et où se trouvent placés la plupart des tubes du récepteur en une ou deux rangées situées au voisinage des parois du four. Au-delà de la zone de radiation, on peut trouver une zone de convection comprenant un faisceau tubulaire en quinconce placé normalement ou parallèlement à la direction des fumées. Dans tous les cas, on cherche à augmenter le débit transféré par un accroissement de la vitesse des fumées et de la surface d'échange en recouvrant le faisceau d'ailettes.

L'enveloppe du four doit satisfaire aux contraintes mécaniques et être étanche afin de maintenir la dépression créée à l'intérieur du four par le tirage de la cheminée.

Les parois intérieures du four sont recouvertes de briques ou de ciments réfractaires permettant d'éviter les échanges par rayonnement tout en limitant les pertes thermiques par conduction vers l'extérieur. Les brûleurs sont placés dans des orifices percés dans les parois du four. Lorsque les températures dans le four sont très élevées, les parois sont constituées de plusieurs épaisseurs de briques, et entre la dernière épaisseur et la paroi métallique on dispose généralement un isolant permettant de réduire plus encore les pertes par conduction. Dans les parois du four, des regards permettent d'observer la combustion, la forme des flammes, la tenue des tubes, etc.

Les fumées quittent le four par l'intermédiaire de la cheminée en traversant, lorsqu'elle existe, la zone de convection. Les fumées sont amenées à la cheminée au travers d'un carneau. La cheminée est constituée de plus en plus d'une armature métallique recouverte à l'intérieur, du moins à sa base, par un ciment réfractaire. Ses dimensions, sa forme et sa hauteur doivent être telles qu'elles assurent un tirage donné que l'on peut régler d'ailleurs par un registre en acier, résistant à la température des fumées et placé à la base de la cheminée.

Tubes et faisceaux tubulaires. A l'exception des fours cylindriques droits où l'on utilise un serpentin hélicoïdal, le faisceau tubulaire est constitué par une association de tubes droits et parallèles, le passage d'un tube à un autre se faisant par des coudes à 180° ou des boîtes de distribution munies de bouchons permettant le nettoyage des tubes. La dimension des tubes est normalisée, et leur qualité et leur nature dépendent essentiellement de l'usage du four. Pour des fluides non corrosifs et des températures peu élevées (400 °C), les tubes et les accessoires sont en acier au carbone. Au-delà de 450 °C, on emploie des aciers réfractaires qui sont des alliages au chrome et au molybdène. Lorsque les températures



Sucmanu - C. Klein

▲ ***Les brûleurs doivent assurer un mélange intime de l'air et du combustible afin d'obtenir une combustion complète de ce dernier : ici, un brûleur industriel au gaz de grosse capacité (entre 4 et 12 kth).***

deviennent supérieures à 700-750 °C, on fait appel à des aciers inoxydables contenant de plus en plus de nickel ou à des alliages tels que l'inconel. Dans de nombreux cas, la température dans les tubes variant d'une extrémité à l'autre, les divers tubes peuvent être de nature différente. Dans le cas des fluides corrosifs, le choix du métal est lié à la nature de la corrosion.

Brûleurs. Nous nous limiterons à une description sommaire des brûleurs à fuel et à gaz. Les brûleurs doivent assurer un mélange intime de l'air au combustible afin d'obtenir une combustion complète de ce dernier. L'air de combustion est introduit par des volets réglables. Le fuel ou le gaz débouche dans le courant d'air au centre d'une buse en réfractaire.

Pour les brûleurs à gaz, le gaz peut être prémélangé à une partie de l'air, permettant ainsi l'obtention d'une combustion plus rapide avec des flammes courtes. Sans ce prémélange, les flammes sont plus longues et plus lumineuses.

Pour les brûleurs à fuel, il faut diviser très finement l'hydrocarbure sous forme d'une pulvérisation obtenue soit mécaniquement, soit par addition de vapeur. La pulvérisation mécanique se fait par détente sur la buse de l'hydrocarbure alimenté sous pression. La pulvérisation à la vapeur d'eau présente plus de souplesse : en effet, il est facile d'adapter les conditions d'alimentation à celles du fonctionnement du four alors qu'une pulvérisation mécanique exigera le changement de la buse si les conditions de fonctionnement varient notablement. Le fuel est généralement préchauffé et la vapeur de pulvérisation doit être essentiellement sèche.

Préchauffeurs. On désigne ainsi la zone de convection lorsqu'elle existe. Il s'agit d'un échangeur de chaleur particulier entre un faisceau tubulaire et les gaz de combustion. On souhaite une perte de charge faible (afin d'éviter l'emploi d'un ventilateur) tout en ayant un débit de chaleur transféré suffisamment grand pour permettre une diminution des investissements. Les faisceaux sont généralement tubulaires et munis de chicanes. L'écoulement du fluide à réchauffer et celui des fumées sont à co-courant afin d'éviter la condensation des vapeurs d'anhydride sulfureux présentes dans les fumées sur les tubes du faisceau, qui entraînerait très rapidement une destruction du faisceau.

* *Principaux types de fours tubulaires*

Il existe de nombreuses géométries pour la construction des fours tubulaires. Ils diffèrent les uns des autres par la forme de la chambre de combustion et la disposition de la zone de convection. On peut tout de même répartir les fours tubulaires à combustion en deux grandes familles en ne considérant que la disposition des tubes dans la zone de radiation qui peut être soit horizontale, soit verticale.

Parmi les *fours à tubes horizontaux,* les plus fréquents possèdent une chambre de combustion de section carrée. Les brûleurs sont situés sur les parois latérales, et par suite les flammes sont horizontales. La zone de convection est placée soit au-dessus, soit à côté, la séparation entre les zones étant dans ce dernier cas assurée par un mur en réfractaire dit *mur d'autel.* La cheminée est en général indépendante du four. Pour les autres fours horizontaux, la chambre de combustion est parallélépipédique. Les tubes sont placés sur les parois latérales et le toit du four. Les brûleurs situés dans la sole ont leur flamme dirigée vers le haut. La zone de convection est située au-dessus de la zone de combustion, et la cheminée est érigée directement au-dessus du four.

Les *fours à tubes verticaux* sont généralement cylindriques, les tubes étant placés dans la plupart des cas circonférentiellement le long de la paroi intérieure. Les brûleurs sont encastrés dans la sole et leur flamme est verticale. La zone de convection prolonge la zone de combustion, et la cheminée est située au-dessus des deux zones. Ces fours présentent un encombrement plus réduit, les zones de combustion, de radiation et la cheminée étant les unes au-dessus des autres. En outre, les zones contribuent au tirage de la cheminée, réduisant ainsi la hauteur de cette dernière.

Calcul des fours tubulaires à combustion

Nous ne détaillerons pas ici les différentes étapes que comporte le calcul théorique d'un four tubulaire. Nous nous limiterons à en faire l'inventaire en indiquant toutefois les principales hypothèses simplificatrices introduites lors de leur développement.

* *1re étape : étude de la combustion*

Les gaz ou les fuels utilisés comme combustibles sont des mélanges d'hydrocarbures généralement aliphatiques contenant très souvent des impuretés, négligeables ou non, telles que le soufre. La combustion des hydrocarbures conduit par craquage à l'apparition de carbone et d'hydrogène se transformant par combustion en gaz carbonique, en oxyde de carbone et en vapeur d'eau. En dehors de ces constituants, les fumées contiennent les gaz inertes de l'air (essentiellement l'azote) et l'oxygène en excès, car les hydrocarbures et l'hydrogène sont généralement totalement consommés.

L'écriture des équations stœchiométriques entre les divers constituants permet d'évaluer l'enthalpie des différentes réactions et en particulier de préciser le pouvoir calorifique du combustible. On appelle ainsi la quantité de chaleur obtenue par 1 kg ou 1 m^3 de combustible dans les conditions normales de température et de pression (0 °C, 1 atm). On distingue le pouvoir calorifique supérieur du pouvoir calorifique inférieur selon que l'eau est prise à 0 °C, sous forme liquide ou sous forme vapeur. Le pouvoir calorifique inférieur des combustibles gazeux et liquides reste compris entre 9 000 et 11 000 kcal/kg. Dans le *Chemical Engineers' Handbook* se trouvent des tableaux donnant les pouvoirs calorifiques des principaux combustibles solides, liquides et gazeux en fonction de leurs caractéristiques physiques. Y figure également

la quantité d'oxygène théorique consommée par la combustion ; mais, pour éviter la formation d'oxyde de carbone, il est nécessaire d'opérer avec un excès d'oxygène ou avec un excès d'air. Cet excès, exprimé en pour cent de la quantité d'air théorique, joue un rôle important dans le calcul du four. En effet, en général, l'air d'alimentation est réchauffé par les fumées dans la zone de convection et un excès d'air diminue d'autant le pouvoir énergétique des fumées. Il faut donc réduire au minimum l'excès d'air, mais on constate dans la pratique qu'au-delà d'un certain seuil il apparaît rapidement de l'oxyde de carbone qui diminue considérablement la quantité de chaleur dégagée par la combustion et nécessite en conséquence une consommation supplémentaire de combustible. Dans les fours récents, l'excès d'air est de 20 à 30 % pour les brûleurs à gaz et de 30 à 40 % pour les brûleurs à fuel.

La composition des fumées dépend de la nature du combustible et de l'excès d'air. Pour prévoir leur enthalpie différentes relations ont été établies par Mallard et Le Chatelier, et on trouvera dans les ouvrages généraux la valeur moyenne des capacités calorifiques entre 0 °C et la température T des fumées pour les gaz suivants : hydrogène, azote, oxyde de carbone, anhydride carbonique, oxygène et vapeur d'eau. La connaissance de l'enthalpie des fumées permet de préciser le rendement énergétique du four. En effet, la différence entre les débits d'enthalpie du fluide alimentant le brûleur, soit H_a, et le débit d'enthalpie des fumées, soit H_f, représente le débit de chaleur transféré au récepteur, à travers les parois du four, aux pertes près, lesquelles sont souvent négligeables. Le rendement global du four est tel que :

(46) $$E\,\% = 100\,\frac{H_a - H_f}{H_a}$$

En outre, pour préciser les échanges par rayonnement entre la flamme et le récepteur, il est nécessaire de connaître la température de la flamme. Une température maximale de la flamme peut être obtenue si la combustion se déroule de manière adiabatique. Dans ces conditions, $H_a = (H_f)_{\text{adiabatique}}$, et la température des fumées ainsi calculée représente la température adiabatique de la flamme, soit T_a. La température de la flamme, et par suite celle des fumées, dont nous indiquerons ci-après une méthode approchée de détermination, est toujours inférieure à T_a dans la mesure où la combustion n'est pas instantanée et où les échanges par rayonnement apparaissent dès que la température de la flamme est supérieure à celle du récepteur.

★ 2ᵉ *étape : étude des échanges entre source, récepteur et parois*

Dans la chambre de combustion. Pour une géométrie donnée, il est possible d'évaluer la quantité de chaleur échangée entre la flamme et les tubes situés au voisinage des parois réfractaires du four. On est toutefois amené à faire un certain nombre d'hypothèses simplificatrices :

— Le transfert dans la zone de radiation entre le gaz et les tubes récepteurs se fait exclusivement par rayonnement.

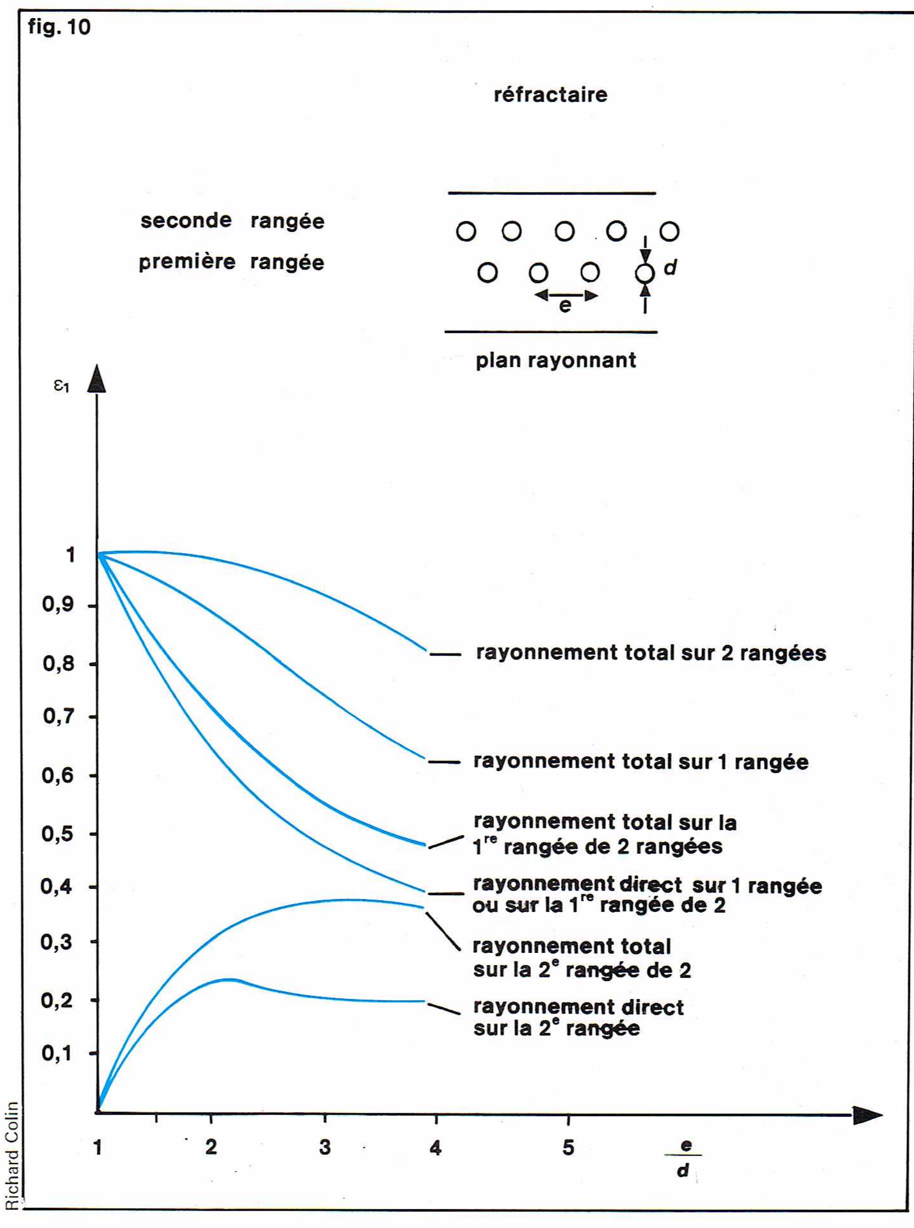
— La surface réceptrice et les gaz de combustion sont à des températures uniformes, respectivement T_1 et T_G. Si la combustion n'est pas instantanée et/ou si la chambre de combustion est allongée, les hypothèses précédentes sont trop grossières. On découpe alors la chambre de combustion en un nombre limité de régions où les hypothèses précédentes pourront être admises.

— Les réfractaires se comportent pour le rayonnement thermique comme des surfaces sans flux. Les pertes par conduction à travers les parois du four sont alors égales au débit transféré par convection par le gaz, mais dans tous les cas ce débit reste très faible devant le débit échangé par rayonnement.

Avec les hypothèses précédentes, le débit transféré par le gaz aux tubes est tel que :

(47) $$\Phi_{G \leftrightarrows 1} = \sigma \mathcal{F}_{1G} \Omega_1 \,(T_G^4 - T_1^4)$$

Ω_1 est la surface extérieure des tubes et $\mathcal{F}_{1G}$ un facteur géométrique. Pour les fours tubulaires à combustion où les tubes sont proches des parois réfractaires, on peut, devant les dimensions géométriques de la phase gazeuse, comme le souligne Mac Adams (*Transmission de la chaleur*, Dunod, Paris, 1964), tenir compte des réflexions sur les réfractaires et remplacer la surface Ω_1 par une surface plane noire égale à la surface des réfractaires Ω_2 multipliée par un facteur total d'émission ε_1.



▲ ***Figure 10 : courbe de la valeur du coefficient d'absorption ε_1 pour des faisceaux tubulaires à une ou deux rangées en quinconce placées contre les parois d'un réfractaire (en fonction du rapport écartement sur diamètre des tubes).***

La *figure* 10 donne les valeurs de ε_1 pour des faisceaux tubulaires à une ou deux rangées en quinconce placées contre les parois d'un réfractaire.

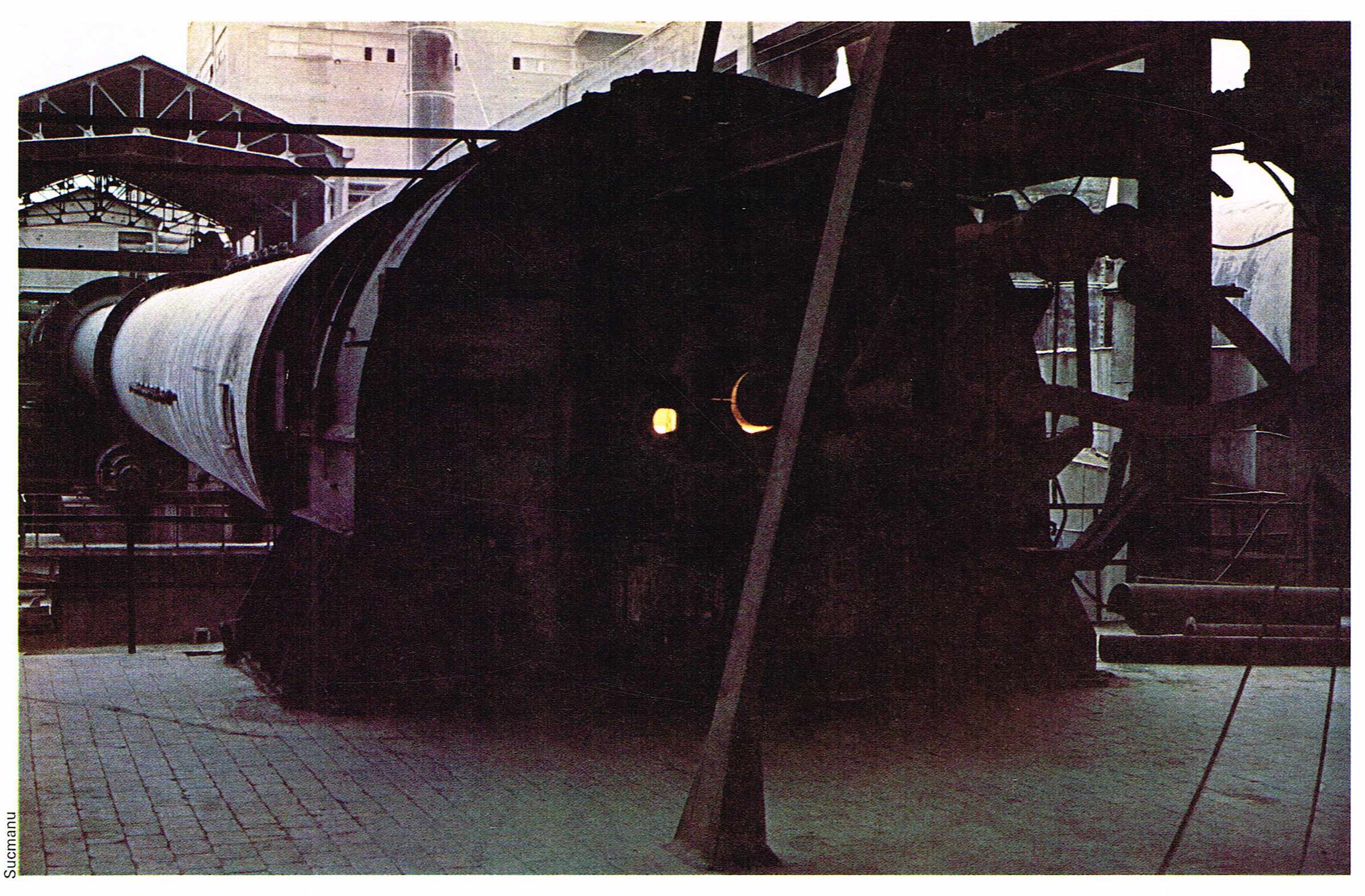
Ces déterminations supposent que le gaz contenu entre les différents tubes et la paroi est transparent au rayonnement thermique.

Dans ces conditions, la surface émettrice est remplacée par une surface plane noire de section $\Omega_R = \varepsilon_1 \Omega_1$, et le débit échangé entre le gaz et le récepteur est tel que :

(48) $$\Phi_{G \rightleftarrows 1} = \sigma \Omega_R \,(\varepsilon_{G,\,pL} T_G^4 - \alpha_{G1\,pL} T_1^4)$$

où ε_G et α_{G1} représentent respectivement le facteur total d'émission et le facteur total d'absorption. Comme nous l'avons indiqué dans la première partie, ces facteurs dépendent de la température du gaz, de la pression partielle des gaz absorbants (essentiellement anhydride carbonique et vapeur d'eau), de la pression totale et de la dimension géométrique de la masse gazeuse L. Nous avons également indiqué comment ces coefficients sont évalués dans la pratique.

La relation **(48)** ne pourra être appliquée qu'à condition que toutes les surfaces réfractaires soient recouvertes de tubes. Si Ω_S représente la surface des réfractaires non recouverte de tubes, le débit transféré entre le gaz et la surface plane noire Ω_R en présence de la surface sans flux Ω_S sera donné par une relation identique à l'équa-



Sucmanu

▲ ***Un*** **four de cimenterie** ***montrant au premier plan le brûleur ; de tels fours tubulaires peuvent dépasser 150 m de longueur.***

tion **(47)**. Le facteur géométrique $\mathcal{F}_{1G}$ sera évalué en supposant le gaz de combustion soit gris, soit réel. Dans ce dernier cas, le spectre d'absorption du gaz réel est réparti en un nombre limité de domaines, et dans chaque domaine de longueurs d'onde ainsi défini, le gaz sera supposé gris.

Si nous considérons comme négligeables les pertes de chaleur par convection à travers les parois du four, la différence entre le débit d'enthalpie des fumées en combustion adiabatique et le débit d'enthalpie des fumées est égale au débit de chaleur échangé par rayonnement entre le gaz et le récepteur, soit :

$$H_{Ga} - H_G = mC_p\,(T_a - T_G) =$$

(49) $$\Phi_{G \rightleftarrows 1} = \sigma \mathcal{F}_{1G} \Omega_1\,(T_G^4 - T_1^4)$$

Connaissant T_a et T_1, la relation **(49)** permet d'évaluer la température des gaz de combustion. En négligeant les pertes par convection, on aboutit à une valeur inférieure de la température du gaz. Cette dernière peut d'ailleurs être établie avec plus de précision en tenant compte de la variation des capacités calorifiques des différents constituants gazeux en fonction de la température.

Lorsque toutes les surfaces réfractaires ne sont pas recouvertes de tubes récepteurs, un bilan de chaleur sur les réfractaires permet d'évaluer la température des réfractaires et par la suite d'estimer une valeur du débit de chaleur perdue à travers les réfractaires.

La température T_1 du récepteur s'obtient à partir de la connaissance du débit transféré, des caractéristiques d'écoulement et des propriétés physico-chimiques du fluide circulant à l'intérieur des tubes placés au voisinage des parois. Le calcul complet du four sera donc en principe résolu avec la détermination des facteurs géométriques $\mathcal{F}_{1G}$.

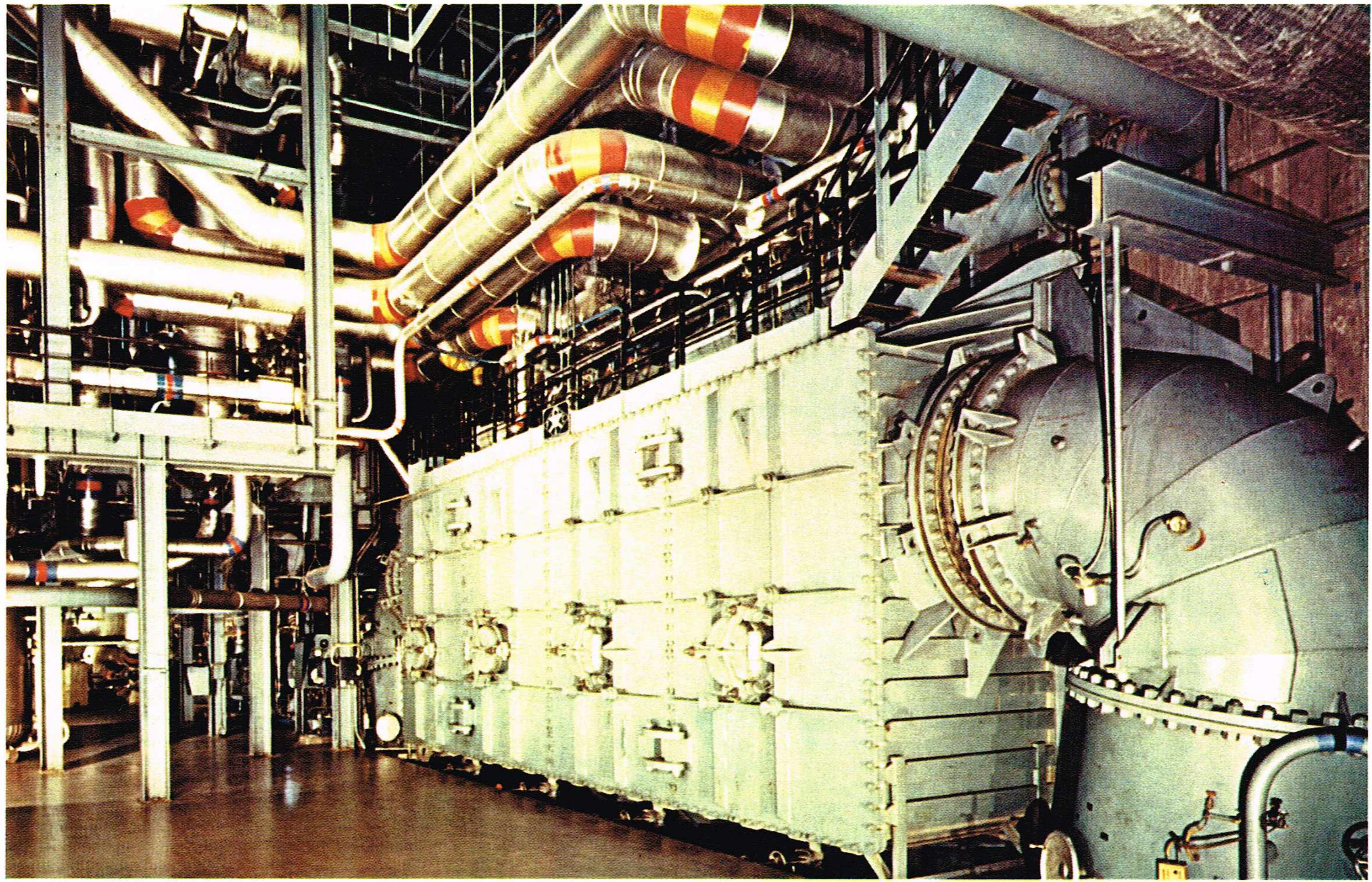
Les flux transférés par rayonnement dans la chambre de combustion varient bien entendu avec le type de four, la nature, la température et la vitesse de circulation du fluide dans les tubes, mais on constate qu'ils restent pratiquement compris entre 25 000 et 55 000 kcal/h/m².

Dans la zone de convection. Dans la zone de convection, lorsqu'elle existe, se trouve un faisceau tubulaire placé normalement ou parallèlement au trajet des fumées. Les tubes sont lisses ou munis d'ailettes. Le calcul de la zone de convection est plus délicat que celui de la zone de radiation car le transfert par rayonnement n'est pas négligeable, en particulier pour les premières rangées du faisceau pouvant être atteintes directement par le rayonnement thermique de la flamme.

Certains auteurs ont proposé des relations simples donnant les différents débits de chaleur transférés, mais toutes ces relations, établies pour des géométries particulières, doivent être utilisées avec précaution. Il est préférable de simplifier le calcul de la zone de convection en la divisant en deux régions. Dans la première, le transfert par rayonnement subsiste, et dans la deuxième le transfert se fait uniquement par convection. Pour cette région on pourra utiliser les relations établies lors des études de transfert de chaleur par convection d'un fluide circulant normalement ou parallèlement à un faisceau tubulaire muni ou non d'ailettes.

* 3e *étape : étude du faisceau tubulaire situé dans la zone de combustion*

Le calcul du four ne peut se concevoir indépendamment de l'étude de l'évolution du fluide circulant dans les tubes contenus dans la zone de radiation. En général, on souhaite avoir à la sortie des tubes un fluide ayant une température, une pression et une composition données (pour le cas d'un changement partiel ou total de phases). Aussi, pour une géométrie donnée, il s'agit de préciser les conditions d'alimentation du fluide. Il est nécessaire, en particulier, de prévoir la perte de charge à l'intérieur des tubes, et, dans le cas d'une vaporisation partielle (cas très fréquent), la perte de charge pourra être évaluée par des méthodes discrètes utilisant des approximations successives ou à l'aide de méthodes graphiques. Si la perte de charge est trop grande, il faudra reprendre le calcul complet du four avec des tubes de diamètres supérieurs. On peut également modifier la disposition géométrique des tubes en plaçant ceux-ci en parallèle lorsque le fluide atteint une température au-delà de laquelle la vaporisation partielle du fluide peut se produire.


Photothèque E.D.F. - Sodel - M. Morceau

▲ *Le condenseur de la centrale thermique classique de Champagne-sur-Oise : la vapeur provenant de la turbine à vapeur y est condensée en eau qui retourne à la chaudière.*

Condenseurs

Description générale des condenseurs

Les condenseurs se présentent toujours comme des appareils à faisceau tubulaire et calandre, et les caractéristiques données lors de l'étude des échangeurs à faisceau et calandre restent valables.

Les applications industrielles des condenseurs apparaissent essentiellement sous trois formes :

— Utilisation de la grande quantité de chaleur libérée par la condensation de vapeur sèche ou saturée pour porter à une température voulue un fluide froid alimentant le faisceau. C'est le cas des productions d'eau chaude par condensation de vapeur.

— Inversement, liquéfaction et refroidissement d'une vapeur pure d'un fluide frigorifique (ammoniac, Fréon, chlorure de méthyle, etc.) avant détente. C'est le cas des appareils de réfrigération à compression et détente en phase liquide.

— Condensation partielle ou totale de mélanges complexes de vapeurs de liquides miscibles et non miscibles en présence ou non de vapeurs non condensables. De tels appareils équipent toutes les tours de distillation des unités de raffinage.

Les condenseurs peuvent être disposés horizontalement et verticalement.

Pour les *condenseurs horizontaux*, la condensation s'effectue essentiellement à l'extérieur des tubes du faisceau. Les chicanes sont échancrées convenablement afin de permettre l'évacuation du condensat se formant à la base du condenseur, la hauteur du liquide condensé étant réglée à l'aide d'un siphon.

Pour les *condenseurs verticaux*, la condensation est réalisée à l'extérieur ou à l'intérieur du faisceau. Dans les deux cas, le niveau du condensat à la base du condenseur est ajusté par l'intermédiaire d'un siphon, débouchant, pour la condensation interne, dans une boîte de réception.

La disposition des chicanes dans les condenseurs horizontaux correspond dans la plupart des cas à l'une des trois dispositions suivantes : — courant divisé à une passe ; — courant divisé, puis regroupé ; — courant doublement divisé, puis regroupé.

Lorsqu'on souhaite utiliser la vapeur condensée pour chauffer le fluide (ou inversement, si l'on souhaite sous-refroidir le condensat), un condenseur vertical présentera plus de souplesse qu'un condenseur horizontal. En effet, dans les condenseurs verticaux, tous les tubes baignent dans le condensat d'une hauteur identique, et le contrôle de la surchauffe ou du sous-refroidissement est facilité.

Calcul des condenseurs

Il est indispensable de distinguer le calcul des condenseurs à vapeur pure surchauffée ou saturante de celui des condenseurs de mélange complexe de vapeurs de liquides miscibles ou non miscibles en présence de vapeurs non condensables.

★ *Cas des vapeurs pures saturées et sèches*

Pour une vapeur saturée, la température du condensat est égale à la température d'ébullition du liquide. La résistance thermique de transfert est, dans de nombreux cas, celle due au film liquide de condensat, mais d'une manière générale, la surface d'échange du condenseur sera évaluée par la relation :

(50)
$$\Omega = \frac{\Phi}{U_S\,(\Delta t)_m}$$

La condensation se faisant à une température sensiblement constante, le contre-courant pur ou les écoulements à co-courant conduisent à la même différence moyenne de température, à savoir la moyenne logarithmique des différences de températures aux deux extrémités, ou DTLM. Le coefficient global de transfert U_S (tubes usagés) est égal à :

(51)
$$\frac{1}{U_S} = \frac{1}{h_2}\frac{d_1}{d_2} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_c} + R_{d2} + R_{d1}$$

d_1 et d_2 représentent les diamètres extérieur et intérieur des tubes du faisceau. $1/h_2$ est la résistance de transfert à l'intérieur du tube. $1/h_c$ est la résistance de transfert dans le film de vapeur condensée. R_{d1} et R_{d2} sont les résistances

d'encrassement dues aux dépôts à l'extérieur et à l'intérieur des tubes. *e* est l'épaisseur des tubes. λ est la valeur moyenne de la conductibilité thermique du matériau solide constituant les tubes du faisceau.

Si la vapeur est surchauffée, avant de pouvoir la condenser, il sera nécessaire de la refroidir. Si la température de la paroi est supérieure à celle de la saturation, il ne se produit pas de changement de phase, et le débit de chaleur transféré peut être prévu par l'une quelconque des relations indiquées lors de l'étude des échangeurs. En revanche, si la température de la paroi est inférieure à celle de saturation, la condensation peut se produire directement, même avec une vapeur surchauffée.

A partir de la température de la vapeur surchauffée (T_v) et de celle du fluide de refroidissement, on peut calculer une température de la paroi en l'absence de condensation :

(52)
$$T_p = \frac{U}{h} T_2 + T_v \left(1 - \frac{U}{h}\right)$$

où U est le coefficient de transfert global en l'absence de condensation et *h* le coefficient de transfert convectif du côté vapeur.

Si la température ainsi calculée est supérieure à la température de saturation, il n'y a pas de condensation. Si la température T_p est inférieure à la température de saturation, il y a condensation de la vapeur surchauffée, et le flux de chaleur transféré est très supérieur à celui que l'on aurait en l'absence de condensation.

Si le condenseur possède une zone de refroidissement, le calcul de cette zone est plus délicat, surtout si l'on souhaite une température finale très précise. Pour les condenseurs verticaux à condensation externe, la surface nécessaire au sous-refroidissement peut être calculée indépendamment et sera additionnée à la surface du condenseur sans zone de sous-refroidissement. Pour les tubes ou les plaques horizontales, par suite du débordement du condensat d'un tube sur un autre, le refroidissement du condensat d'épaisseur variable le long du tube des échangeurs devra être calculé en discrétisant la longueur des tubes.

La perte de charge, côté vapeur, diminue la température finale du condensat ainsi que la moyenne des différences de température entre l'entrée et la sortie, et il sera indispensable de la préciser. Si les températures de la vapeur et du condensat sont fixées aux extrémités, une estimation de la perte de charge ne permettra pas d'obtenir les spécifications voulues. En outre, l'évaluation des pertes de charge pour des écoulements diphasiques étant peu précise, le calcul des condenseurs devra prendre en considération les conséquences d'une perte de charge supérieure à celle calculée.

La condensation des vapeurs pures saturées ou surchauffées peut s'effectuer dans les différents types de condenseurs. Nous avons donné dans la première partie les principales corrélations permettant d'évaluer le coefficient de transfert h_c du film de condensat. Pour la condensation à l'extérieur des tubes, la perte de charge peut être obtenue à l'aide des résultats et des méthodes préconisées par Diehl et Uruh (*Petrol. Ref.* 36, 10, 147 [1957], 37, 10, 124 [1958]). Pour la condensation à l'intérieur des tubes, on emploiera les relations générales préconisées par les articles généraux sur les écoulements diphasés et dont les principaux résultats sont rapportés dans le *Chemical Engineers' Handbook*. Signalons que, dans les condenseurs verticaux à condensation interne, où la phase vapeur et la phase liquide s'écoulent à contre-courant (cas des condenseurs situés sur les reflux des colonnes à distiller), l'écoulement de la phase vapeur retarde et diminue l'épaisseur du condensat, et, pour ces condenseurs, ni le transfert de chaleur ni la perte de charge n'ont été encore correctement analysés.

* *Cas d'un mélange complexe de vapeurs*

L'étude de la condensation des mélanges complexes de vapeur fait apparaître plusieurs cas :

— Toutes les vapeurs sont condensées à la température minimale atteinte dans le condenseur en donnant une phase liquide miscible.

— Tous les constituants sont substantiellement solubles dans le condensat, même si la température d'ébullition est inférieure à celle du condensat.

— Un ou plusieurs constituants ne sont ni condensables, ni solubles dans les conditions de température et de pression du condenseur.

Pour la condensation d'un mélange complexe de vapeur, la composition de la phase vapeur et du condensat varie tout le long des tubes et des gradients de compositions apparaissent dans les deux phases. Les études des gradients de température et de composition ont été faites dans le cas des mélanges binaires, d'une part pour un mélange de deux vapeurs donnant des liquides miscibles (Colburn et Drew, *Trans. Am. Inst. Chem. Engrs.*, 33, 196 [1937]) et d'autre part pour un mélange d'une vapeur avec un gaz insoluble (Colburn et Hougen, *Ind. Eng. Chem.*, 26, 1178 [1934] ; Colburn et Edison, *Ind. Eng. Chem.*, 33, 457 [1941]). Ces calculs nécessitent la connaissance des coefficients de diffusion, et à chaque étape du calcul il faudra estimer la température, la composition, les débits d'enthalpie en fonction de la quantité de chaleur transférée. On suppose, en outre, que l'équilibre thermodynamique est réalisé à l'interphase liquide-vapeur à la température locale de la vapeur. Cela n'est pas très exact dans la mesure où le condensat et l'interphase liquide-vapeur sont à une température intermédiaire entre celle de la vapeur et celle du fluide de refroidissement.

En outre, si la principale résistance au transfert thermique est celle du film vapeur, la surface d'échange Ω peut être évaluée à l'aide de la relation :

(53)
$$\Omega = \int_0^{\Phi} \frac{1 + Uz/h_{sv}}{U\,(T_v - T_2)}\, d\Phi$$

U est le coefficient de transfert global entre la vapeur à la température T_v et le fluide de refroidissement à la température T_2. Cette résistance englobe en particulier la résistance du film du condensat et celles des dépôts interne et externe. La résistance de film du condensat est obtenue à l'aide des corrélations établies dans le cas des vapeurs pures. h_{sv} est le coefficient de transfert convectif pour la phase vapeur en l'absence de condensat. *z* est le rapport du débit de chaleur transféré en l'absence de condensat au débit de chaleur total transféré. Ce rapport est obtenu à l'aide de calcul thermodynamique et il peut varier notablement d'une extrémité à l'autre du condenseur, surtout si la vapeur contient un gaz non condensable. Le coefficient de transfert h_{sv} devra être évalué à chaque pas d'intégration. Le principe de cette procédure de calcul est voisin de celui préconisé par Ward (*Petro. Chem. Engr.*, 32, II, 42 [1960]).

La perte de charge, dans le cas d'une vapeur complexe, est obtenue à l'aide des relations préconisées dans le cas des vapeurs pures, en tenant compte cependant de la variation de la vitesse de la phase vapeur en fonction de la température de cette dernière.

Évaporateurs

Dans les évaporateurs, la surface d'échange représente la plus grande part dans le coût de l'appareil, et, toutes choses étant égales par ailleurs, il faudra rechercher le type d'évaporateurs conduisant au plus grand coefficient de transfert.

Il existe deux utilisations principales des évaporateurs.

La première correspond à la séparation d'une phase vapeur et d'une phase liquide (récupération ou élimination d'un solvant). La vaporisation du solvant provoque par contrecoup la concentration de la phase liquide résiduelle sans provoquer la précipitation du ou des solutés présents dans la solution. Comme nous l'indiquerons ci-après, on essaie de récupérer la vapeur ainsi produite pour chauffer et même vaporiser le mélange lui-même. On aboutit alors à une association particulière d'évaporateurs dits *à effets multiples*. On peut également comprimer la vapeur ainsi produite et l'utiliser ensuite comme source de chaleur dans le même évaporateur.

Dans la deuxième utilisation des évaporateurs, la vaporisation et la température de la solution sont telles que le soluté présent dans la phase liquide précipite. Dans le cas de mélange de solutés, cette précipitation peut être sélective. De tels évaporateurs dits *à cristallisation* conduisent à des cristaux de tailles uniformes, bien définies dans le cas d'une circulation forcée du liquide. En dehors des dépôts dus à la corrosion et des impuretés présentes dans l'alimentation, la précipitation du soluté se produit sous forme de cristaux si la solubilité du soluté augmente avec la température, et sous forme d'écailles si la solubilité du soluté diminue avec la température. Si l'on souhaite éviter la précipitation, il est indispensable de maintenir le

solvant en contact fréquent et permanent avec la plus grande surface du solide déposé. Dans le cas des évaporateurs à cristallisation, le temps de contact du solide précipité avec la surface de chauffe doit être faible afin d'éviter la dégradation thermique du soluté. En outre, dans ces évaporateurs, les effets contaminants et catalytiques de la phase solide constituant la surface de chauffe orientent leur choix.

Description générale des évaporateurs

Les évaporateurs se différencient par la manière dont s'effectue le chauffage du liquide à vaporiser. La disposition entre la source de chaleur et le liquide à vaporiser se présente sous les quatre formes principales suivantes :

— La source de chaleur est séparée du liquide à vaporiser par des surfaces tubulaires.

— La source de chaleur circule dans des serpentins, des espaces annulaires plans, des doubles enveloppes, etc., et le liquide à vaporiser s'écoule à l'extérieur.

— La source de chaleur est en contact direct avec le liquide à vaporiser.

— La vaporisation est provoquée directement par le rayonnement solaire.

De très loin, le plus grand nombre d'évaporateurs industriels utilise des surfaces de chauffe tubulaires. Nous nous limiterons à leur étude et, pour chacun des types d'évaporateurs tubulaires, nous indiquerons les principales caractéristiques et le domaine d'application.

* *Évaporateurs à circulation forcée*

Bien qu'ils ne soient pas les plus économiques, ils sont fréquemment utilisés pour les divers usages par suite de la circulation forcée du liquide à vaporiser. La circulation obtenue à l'aide d'une pompe rend possible la séparation des étapes, chauffage, vaporisation du solvant et cristallisation. Si la circulation forcée est sans conséquence sur la vitesse d'évaporation, elle permet de maintenir en suspension les solides cristallisés, et ce type d'évaporateur est particulièrement bien adapté pour les opérations de cristallisation. Signalons que la présence des particules solides contribue à une érosion rapide des tubes, d'où la nécessité de bien choisir le matériau constituant ces derniers. Si l'on désire éviter la précipitation et utiliser l'évaporateur en séparateur vapeur-liquide, il faut maintenir le niveau du liquide à une hauteur suffisante dans les tubes à vaporisation par l'intermédiaire d'un tube immergé dans le liquide froid d'alimentation dont le niveau est situé au-dessus des surfaces chauffantes.

Le *tableau* XIII résume les principales caractéristiques et les domaines d'application des évaporateurs à circulation forcée.

* *Évaporateurs verticaux à tubes courts*

Ce sont les premiers à avoir été construits à l'échelle industrielle; leur usage reste toutefois encore très répandu dans l'industrie sucrière. La circulation dans les tubes chauffants est provoquée par l'ébullition du liquide. Les tubes placés verticalement ont un diamètre de 5 à 7,5 cm et une longueur de 1,20 à 1,80 m. Le débit liquide à l'intérieur des tubes est plusieurs fois le débit d'alimentation. Le passage du fluide chaud de la sortie supérieure du faisceau à sa base se fait par l'intermédiaire d'un puits central dont la section est du même ordre de grandeur que la surface des plaques du faisceau. L'efficacité de ces évaporateurs dépend totalement du niveau du liquide dans les tubes, et, pour empêcher une précipitation des solutés, le niveau du liquide dans les tubes devra être le plus élevé possible. Dans le cas d'une cristallisation, si l'on souhaite éviter une sédimentation des cristaux en cas d'arrêt de l'ébullition, on dispose un système mécanique d'agitation dans le puits central. Cela permet, en outre, d'augmenter la capacité des évaporateurs à tubes courts.

Le *tableau* XIV résume les principales caractéristiques et les domaines d'application des évaporateurs verticaux à tubes courts.

* *Évaporateurs verticaux à tubes longs*

La plupart des évaporations industrielles sont effectuées de nos jours dans ce type d'évaporateurs, car, à capacité identique, leur prix de revient est inférieur à celui des autres.

Le liquide à vaporiser traverse un faisceau tubulaire à une passe constitué par des tubes de diamètre moyen 5 cm (diamètre minimal 2,5 cm) et dont la longueur reste comprise entre 6 m et 10,5 m. Au sommet des tubes, le liquide est entièrement vaporisé et le temps de contact du liquide ne dépasse pas quelques secondes. La circulation du liquide et de la vapeur est due à l'ébullition du liquide, et la température de ce dernier varie notablement au cours de la traversée dans le tube. Dans ces évaporateurs, très utilisés dans l'industrie papetière pour concentrer la liqueur noire, le liquide étant ascendant (évaporateurs *à film ascendant*), les forces de gravité augmentent la perte de charge du liquide dans les tubes. On peut éliminer la contribution de la gravité dans la perte de charge en imaginant une alimentation en liquide au sommet du faisceau. Dans ces évaporateurs verticaux dits *à film tombant*, la distribution du liquide est très importante, car les parois du tube doivent être mouillées de manière uniforme.

Ces évaporateurs, qu'ils soient à film ascendant ou tombant, sont utilisés généralement pour concentrer des solutions et non pour provoquer des cristallisations. Certes, en modifiant le niveau du liquide dans les tubes, on peut les employer pour précipiter des solutés, mais il est alors indispensable d'opter pour un évaporateur

Tableau XIII
Caractéristiques et domaines d'application des évaporateurs à circulation forcée

Avantages	Coefficient de transfert élevé Circulation forcée Évaporateur polyvalent
Inconvénients à la réalisation	Coût élevé Puissance consommée par la pompe de circulation Temps de contact et de séjour dans les tubes élevés
Inconvénients au fonctionnement	Rendement faible de la circulation forcée Formation de dépôts par suite de l'ébullition Corrosion et érosion des tubes Possibilité de pistonnage dans les tubes par suite de la formation de cristaux de soluté et des dépôts
Domaines d'application	Évaporateurs à cristallisation Vaporisation de solutions corrosives Vaporisation des solutions visqueuses

Tableau XIV
Caractéristiques et domaines d'application des évaporateurs verticaux à tubes courts

Avantages	Coefficient de transfert élevé pour de grandes différences de température Hauteur réduite Désincrustation mécanique des cristaux et des écailles Peu coûteux
Inconvénients au fonctionnement	Coefficient de transfert faible pour de petites différences de températures Encombrement au sol important Temps de contact important Coefficient de transfert faible pour les liquides visqueux
Domaines d'application	Évaporateurs de solvant Évaporateurs de cristallisation si l'évaporateur possède un système d'agitation Vaporisation de solutions peu corrosives Désincrustation facile des précipités

▲ ***Tableaux XIII et XIV : caractéristiques et domaines d'application des évaporateurs à circulation forcée, et des évaporateurs verticaux à tubes courts.***

Tableau XV Caractéristiques et domaines d'applications des évaporateurs verticaux à tubes longs à film ascendant ou tombant	
Avantages	Faible coût Grande surface de chauffe Faible temps de contact Encombrement au sol réduit Bon coefficient de transfert pour les différences de température raisonnables pour les évaporateurs à film ascendant Bon coefficient de transfert pour des différences de température quelconques pour les évaporateurs à film tombant
Inconvénients à la réalisation	Hauteur élevée Peu adaptés comme évaporateurs de cristallisation Faible coefficient de transfert pour les faibles différences de température Une pompe d'alimentation est nécessaire pour les évaporateurs à film tombant
Inconvénients au fonctionnement	Le rendement des évaporateurs à film ascendant est très sensible aux conditions opératoires La distribution uniforme du liquide dans les évaporateurs à film tombant est délicate
Domaines d'application	Évaporateurs de solvant Évaporateurs de liquide moussant Évaporateurs de liquide corrosif Grande capacité de vaporisation Évaporateurs à film ascendant dans le cas de grandes différences de température Évaporateurs à film tombant dans le cas de petites différences de température et pour des températures de bas niveau

▲ ***Tableau XV :*** ***caractéristiques et domaines d'application des évaporateurs verticaux à tubes longs à film ascendant ou tombant.***

▼ ***Tableau XVI :*** ***caractéristiques et domaines d'application des évaporateurs à tubes horizontaux.***

ascendant afin d'éviter la formation de pistonnage. Le chauffage des tubes de chauffe est obtenu par de la vapeur et pour les évaporateurs à film ascendant la différence de température est relativement faible (écoulements à contre-courant) alors qu'elle devient importante dans les évaporateurs à film tombant (écoulements à co-courant). Cependant, dans les deux cas, les coefficients de transfert sont très élevés.

Le *tableau* XV résume les principales caractéristiques et les domaines d'application des évaporateurs verticaux à tubes longs à film ascendant ou tombant.

Tableau XVI Caractéristiques et domaines d'application des évaporateurs à tubes horizontaux	
Avantages	Hauteur réduite Grande surface de séparation entre le liquide vaporisé et la vapeur Coût modéré pour les évaporateurs de faible longueur
Inconvénients à la réalisation	Peu adapté comme évaporateur de cristallisation Prix de revient élevé des évaporateurs à tubes courbés permettant d'envisager des évaporations conduisant à des dépôts et à des cristaux
Domaines d'application	Hauteur limitée Évaporateurs de petite capacité Évaporateurs à tubes droits pour les évaporateurs à solvant Évaporateurs à tubes courbés pour les évaporateurs à cristallisation

* *Évaporateurs à tubes horizontaux*

Ces évaporateurs sont assez peu utilisés, sauf pour l'obtention d'eau pure pour les chaudières. Le liquide à vaporiser circule généralement à l'extérieur des tubes, la vapeur de chauffage circulant à l'intérieur des tubes du faisceau. Ce type de conception interdit l'utilisation de ces évaporateurs comme appareils de cristallisation par suite de la difficulté de détacher les dépôts et les cristaux formés à l'extérieur des tubes.

Le *tableau* XVI résume les principales caractéristiques et les domaines d'application des évaporateurs horizontaux.

Association des évaporateurs

* *Évaporateurs à simple effet*

Les évaporateurs décrits précédemment sont dits *à simple effet.* Ils sont employés lorsque la capacité de vaporisation est faible, la vapeur permettant le chauffage des tubes étant à bon marché et celle résultant de la vaporisation, qui est corrosive et contaminée, interdisant alors une réutilisation possible. Les évaporateurs à simple effet peuvent fonctionner en système fermé, en système semi-fermé pour la production, et en système ouvert.

* *Évaporateurs à simple effet et à thermocompression*

La méthode la plus simple, mais sûrement pas la moins onéreuse, de réutiliser la vapeur produite est de la comprimer. La vapeur ainsi obtenue est surchauffée et peut servir de source de chaleur pour chauffer le faisceau tubulaire de l'évaporateur lui-même ou de tout autre appareil. La thermocompression peut être obtenue mécaniquement ou à l'aide de jets dans une turbine utilisant une fraction de la vapeur produite.

Pour une compression mécanique, si l'on souhaite que le prix de revient du compresseur reste raisonnable, il faut que les différences de température dans l'évaporateur ne dépassent pas une dizaine de degrés.

La compression à l'aide de jets de vapeur est adéquate lorsqu'on dispose de vapeur à haute pression que l'on peut introduire sous forme de jets sur les pales de la turbine du compresseur.

* *Évaporateurs à effets multiples*

Ce dispositif est de loin le plus économique du point de vue énergétique. On peut le mettre en œuvre lorsque la vapeur produite par la vaporisation au niveau d'un évaporateur peut être utilisée. En effet, si ce dernier travaille à la température normale d'ébullition, la vapeur produite est telle que, par condensation sur les surfaces de chauffe d'un deuxième évaporateur, elle peut permettre l'évaporation d'une quantité égale d'un liquide à la température normale d'ébullition ; la vapeur produite peut servir à un troisième évaporateur, et ainsi de suite.

On peut donc envisager une association en série de plusieurs évaporateurs ; on rencontre fréquemment dans l'industrie des évaporateurs à 6 et 7 effets, et des évaporateurs à 10 effets et plus ont été construits. En première approximation, l'économie en vapeur est proportionnelle au nombre d'effets. Cependant, le prix de revient et de fonctionnement augmentant avec le nombre d'effets, on ne dépasse pas le nombre d'effets indiqués précédemment.

En outre, dans ces associations, l'alimentation du liquide froid à vaporiser peut se faire à différents niveaux, soit : — au dernier effet, alimentation en aval ; — au premier effet, alimentation en amont ; — au dernier et au premier effet, alimentation mixte ; — à tous les effets, avec un soutirage de liquide concentré à tous les effets. Ce dernier dispositif est employé lorsque la vaporisation est accompagnée de précipitation.

Des récupérateurs de chaleur sont généralement associés aux différents effets afin d'accroître l'économie de vapeur ; le condensat de la vapeur de chauffe doit quitter l'évaporateur à la température la plus basse, aussi utilise-t-on ces condensats pour préchauffer les liquides d'alimentation dans des récupérateurs. Ces récupérateurs se réduisent à de simples échangeurs liquide-liquide, qui, à cause de leur complexité, n'équipent que des évaporateurs de grandes capacités. Plus fréquemment, la vapeur condensée étant à une pression élevée, le condensat du premier effet est détendu à la pression de fonctionnement du deuxième effet, et ainsi de suite. Pour les évaporateurs à alimentation en amont, le liquide est préchauffé par la vapeur perdue à chaque effet.

Les évaporateurs à effets multiples ont connu un développement considérable durant ces dernières années pour la production d'eau potable à partir d'eau de mer.

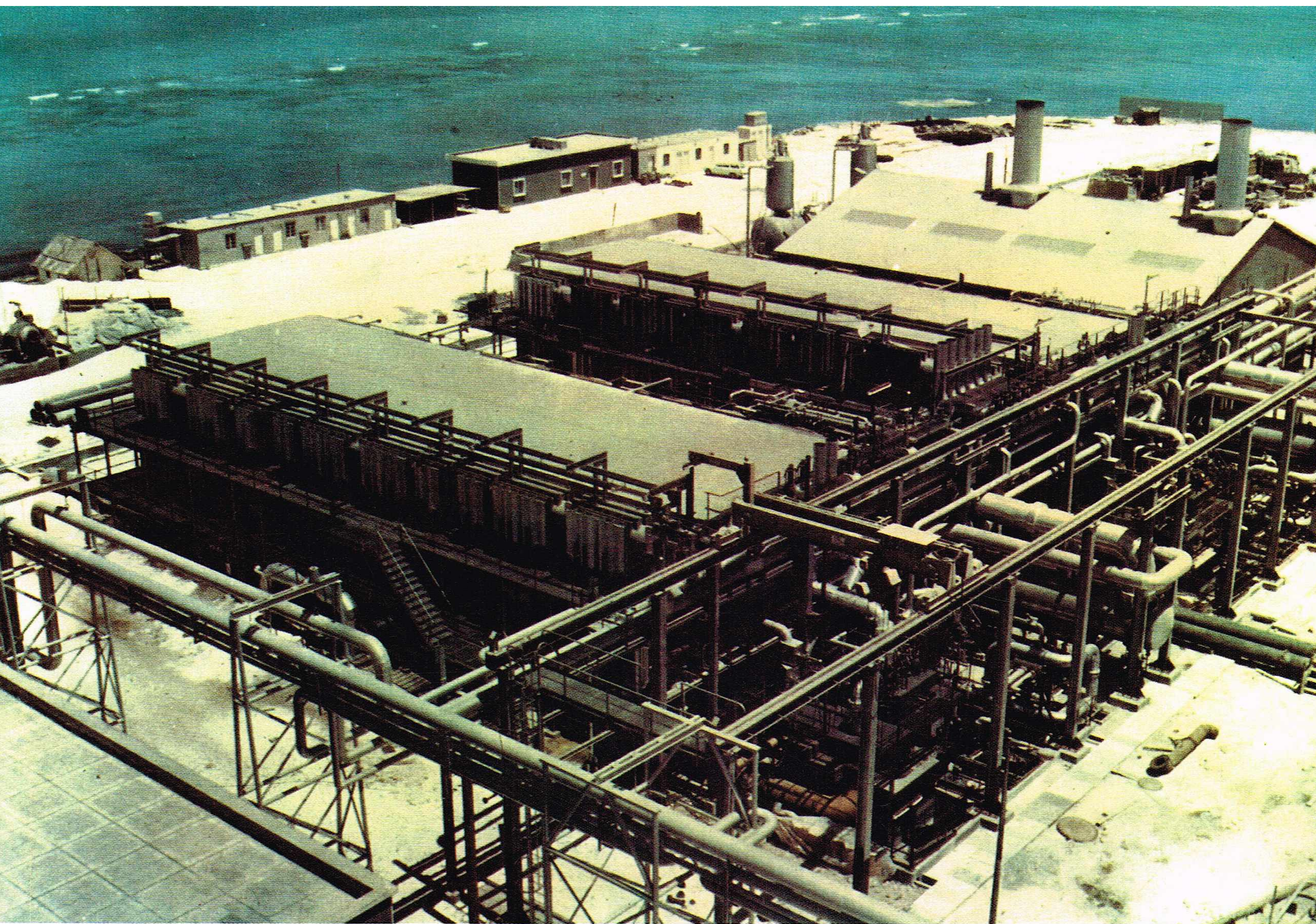


Photo C.E.M.

▲ ***Une usine de dessalement de l'eau de mer mise en service au Qatar en 1973. L'ensemble des deux évaporateurs (évaporateur à effet multiple) produit 20 000 m³ d'eau douce par jour.***

Calcul des évaporateurs

Le calcul des surfaces de chauffe d'un évaporateur est délicat, car les corrélations donnant les coefficients de transfert sont établies pour la vaporisation de liquides purs et propres, alors que dans de nombreux cas, les solutions à évaporer contiennent des solutés en concentrations élevées, que l'on cherche d'ailleurs à précipiter dans les évaporateurs à cristallisation.

Pour les évaporateurs, et contrairement aux autres appareils, la surface de chauffe est définie comme celle en contact avec le liquide à vaporiser. Quel que soit le type d'évaporateurs, les études expérimentales ont conduit les auteurs à présenter leurs résultats expérimentaux sous forme de courbes, et, si des corrélations sont proposées, il sera indispensable de bien connaître les conditions pour lesquelles elles ont été établies avant de pouvoir les utiliser.

* *Évaporateurs à circulation forcée*

Si, dans les tubes, la pression hydrostatique du liquide est suffisante, l'ébullition ne s'y produit pas et le coefficient de transfert global pourra être estimé à partir des corrélations établies pour la convection forcée et la condensation. Lorsque le liquide se vaporise à l'intérieur du tube, le coefficient de transfert devient plus grand et Fragen et Badger (*Ind. Eng. Chem.*, 28, 534 [1936]) ont proposé une corrélation empirique applicable à ce type d'évaporateurs.

* *Évaporateurs à circulation naturelle*

Pour les évaporateurs verticaux à tubes longs et courts, il existe de nombreux résultats expérimentaux donnant le coefficient de transfert dans la zone d'ébullition et la perte de charge d'accélération due à l'écoulement simultané de la phase liquide et de la phase vapeur. Pour plus d'informations, on pourra se reporter au *Chemical Engineer's Handbook* et aux ouvrages généraux indiqués dans la première partie.

Tours de réfrigération

Nous désignons ainsi tous les appareils où la vaporisation d'un liquide provoque son refroidissement. Généralement, la vaporisation est due à un écoulement d'air à la surface du liquide; depuis très longtemps, on sait qu'il est possible de refroidir de l'eau en exposant sa surface à un courant d'air. Aussi la plupart des tours de réfrigération concernent le refroidissement d'eau par l'air ambiant. Dans ce qui suit, nous nous limiterons exclusivement à ces problèmes. Le débit de chaleur transféré entre l'air et l'eau comporte d'une part la chaleur latente de vaporisation de l'eau, et d'autre part le débit transféré par convection, l'eau liquide et la vapeur d'eau contenues dans l'air n'étant pas à la même température. La première contribution représente sensiblement 80 % du débit de chaleur transféré. La quantité maximale d'eau vaporisée dans le courant d'air dépend de la température de l'air et de son degré hygrométrique. Ce dernier peut d'ailleurs être mesuré à l'aide du psychromètre à bulbe dont la température, voisine de la température de saturation adiabatique, représente la valeur minimale que peut atteindre la température de l'eau refroidie. Pratiquement, la température la plus froide du liquide reste légèrement supérieure à la température de saturation adiabatique, car il est impossible de mettre en contact tout le liquide avec l'air. La différence entre ces deux températures dépend de la conception de l'appareil dont les paramètres essentiels sont : — le temps de contact air-eau; — la surface de contact; — l'état de dispersion de l'eau.

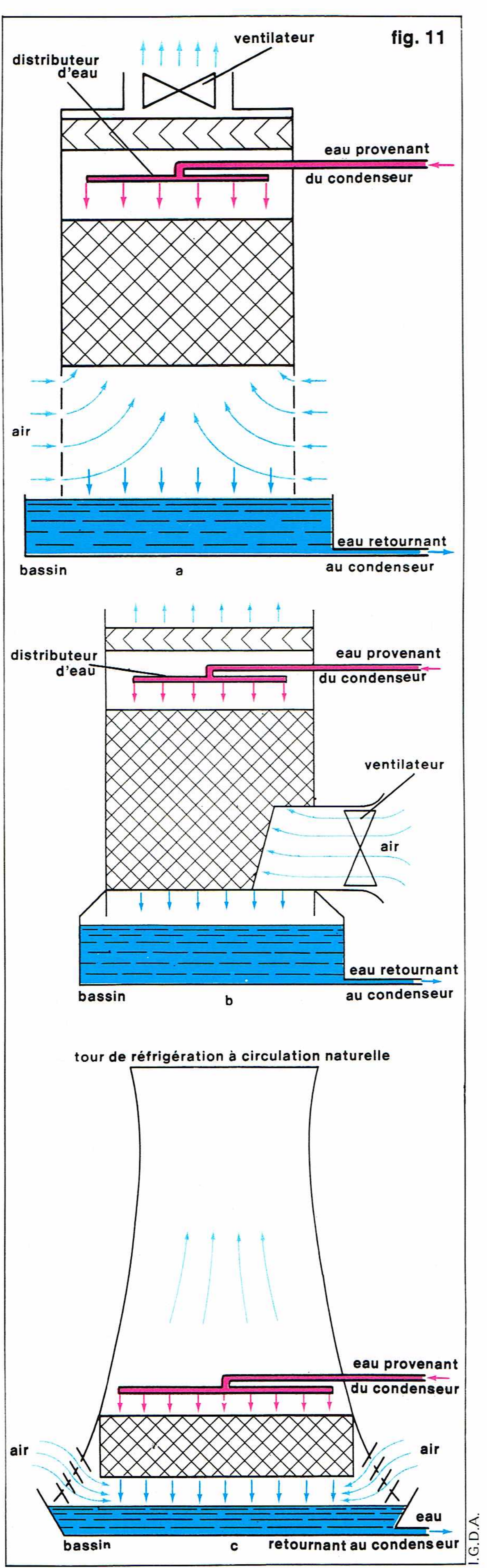
A l'heure actuelle, les réalisations les plus performantes permettent de s'approcher de la température de saturation adiabatique à mieux que 1 °C.

Avant d'indiquer brièvement les méthodes d'étude théorique des tours de réfrigération, nous allons présenter les différentes conceptions technologiques permettant de refroidir de l'eau par évaporation dans un écoulement d'air.

Description générale des tours de réfrigération

Nous pouvons répartir les différents appareils de refroidissement d'eau par l'air en deux grandes familles selon que l'écoulement de l'air est obtenu de manière mécanique ou de manière naturelle (*fig.* 11).

▶ ***Figure 11 :* différents types de tours de réfrigération; a et b, à circulation mécanique à aspiration; c, à circulation naturelle.**



* *Tours à circulation mécanique*

L'écoulement des deux phases est assuré mécaniquement. La phase liquide est dispersée généralement au sommet de la tour, l'atomiseur étant alimenté à l'aide d'une pompe.

Dans les tours de réfrigération dites *à aspiration,* l'écoulement de l'air est provoqué par une hélice d'aspiration montée sur le socle de la tour; l'air, dont le débit est forcé à la base de la tour, s'échappe à une vitesse faible à son sommet. Dans ces appareils, l'hélice et le moteur d'entraînement sont situés à l'extérieur de l'enceinte, ce qui facilite leur entretien et leur contrôle. Dans la mesure où le système mécanique d'aspiration n'est pas placé au sommet de la tour où l'air est chaud et humide, l'hélice n'est pas soumise à une atmosphère humide très corrosive, mais, la vitesse de l'air étant faible, la circulation de l'air humide avec l'air d'alimentation est importante. Cela a comme conséquence une diminution notable des performances de la tour.

Pour remédier à cet inconvénient, on a réalisé les tours à circulation mécanique, dites *à entraînement.* Dans la tour, la circulation de l'air est forcée mécaniquement tout au long de la colonne. L'écoulement de l'air et de l'eau se fait soit transversalement (écoulements perpendiculaires), soit à contre-courant. L'écoulement à contre-courant est thermodynamiquement plus efficace, car l'eau la plus froide est en contact avec l'air le plus froid. Cependant, si l'on souhaite que la différence de température entre le liquide froid et la température de saturation adiabatique ne soit pas trop faible, on trouve que les deux conceptions nécessitent des caractéristiques de fonctionnement voisines. Aussi le choix entre les tours à entraînement transversal et à contre-courant dépendra-t-il du taux de remplissage de la tour, des conditions de fonctionnement, et du coût à la construction.

Les performances d'une tour de réfrigération donnée sont fonction d'une part du rapport $\frac{L}{G}$ (L et G désignent respectivement le débit massique d'eau et le débit massique d'air sec traversant la colonne), et d'autre part du temps de contact entre l'air et l'eau.

Industriellement, la valeur optimale de $\frac{L}{G}$ est obtenue en faisant varier le débit d'eau, le débit d'air étant maintenu constant. Puis la colonne est adaptée aux conditions requises de fonctionnement en modifiant convenablement le débit d'air à traiter. Le temps de contact entre l'air et l'eau est lié très étroitement au temps de séjour du liquide entre les trous de l'atomiseur et le bac de réception du liquide froid. Pour un débit d'eau fixé, il dépend par conséquent de la hauteur de la colonne. On constate l'existence d'un temps de contact minimal au-delà duquel il n'est pas possible, même en modifiant le rapport L/G, d'atteindre un refroidissement fixé.

En résumé, les paramètres fonctionnels d'une tour de réfrigération à circulation mécanique sont :

— Le degré de refroidissement de l'eau (différence de température entre l'eau d'alimentation et celle du bac de réception).

— Le degré d'approche à la saturation (différence de température entre l'eau du bac et celle de l'air humide au niveau du bac).

— Le débit massique d'eau à refroidir.

— Le degré hygrométrique de l'air d'alimentation.

— La vitesse de l'air dans la tour.

— La hauteur de la tour.

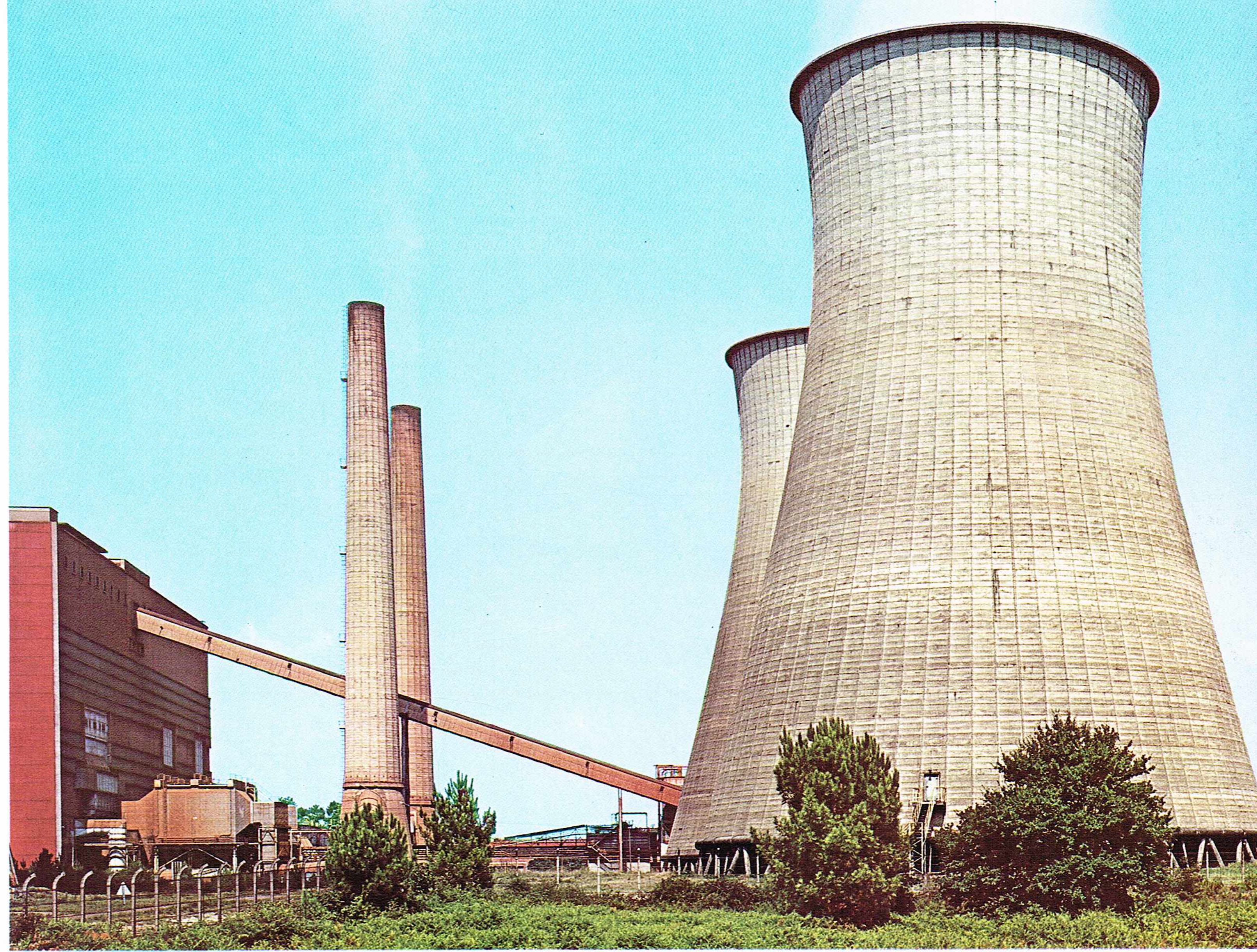
* *Tours à circulation naturelle*

La désignation globale sous le nom de tour n'est pas très correcte dans la mesure où ces appareils se présentent soit sous forme de tour, soit comme une suite de bassins.

— *Tours de réfrigération à circulation naturelle*

La circulation de l'air se fait sous forme de vent, et le débit de liquide que l'on veut refroidir à une température donnée dépend des cinq paramètres suivants : — le degré du refroidissement de l'eau; — le degré d'approche à la saturation; — la vitesse du vent; — la hauteur de la tour; — la température de l'air humide.

Par suite du nombre infiniment grand de combinaisons possibles entre ces cinq paramètres, on trouve dans la littérature des courbes donnant L en fonction des degrés de refroidissement et d'approche pour une tour de hauteur



Photothèque E.D.F. - Sodel - Bérenger

▲ ***Les tours de réfrigération à circulation naturelle sont reconnaissables à leur forme d'hyperboloïde de révolution; on les rencontre près des centrales nucléaires ou classiques; ici, les deux tours de la centrale thermique au lignite d'Arjuzanx dans les Landes.***

donnée, la vitesse du vent et la température de l'air humide étant généralement fixées. Les résultats ainsi trouvés sont ensuite corrigés en fonction des trois paramètres fixés *a priori*.

Les tours de réfrigération à circulation naturelle se présentent généralement sous la forme d'hyperboloïdes de révolution. Depuis l'origine, elles ont été envisagées pour de très grandes capacités de refroidissement, et elles peuvent atteindre 80 m de diamètre et 100 m de haut. Ces tours n'ont pas la souplesse de fonctionnement des tours à fonctionnement mécanique, car l'écoulement d'air est dû essentiellement à la différence de masse volumique entre l'air froid d'alimentation et l'air chaud quittant la tour. Ce dernier, plus léger que l'air ambiant, provoque un effet cheminée; de ce fait, la présence d'hélices de circulation n'est pas nécessaire.

En outre, à la différence des tours à circulation mécanique, les tours à circulation naturelle dépendent simultanément de l'humidité relative et de la température humide de l'air ambiant. En effet, l'humidité de l'air favorise la circulation de l'air dans la tour en augmentant les différences de pression statiques provoquant l'écoulement de l'air. Aussi, ces tours se trouvent particulièrement bien adaptées aux régions où l'humidité relative de l'air ambiant est importante (75 à 80 %).

— *Bassins à aspersion*

Ces bassins permettent de refroidir l'eau par évaporation, et la dispersion de l'eau en gouttes au-dessus du bassin réduit considérablement la surface des bassins.

La dispersion est obtenue à l'aide de buses qui doivent diviser finement l'eau sans conduire à la formation d'aérosols ou de brouillards qui, entraînés par le courant d'air, conduiraient à une perte en eau excessive. L'orientation du bassin vis-à-vis de la direction prédominante des vents est un facteur essentiel; un bassin rectangulaire, à largeur étroite mais convenablement orienté, conduit à un refroidissement par unité de surface supérieur à celui obtenu dans les mêmes conditions avec un bassin carré. En principe, le grand axe du bassin est orienté normalement à la direction des vents d'été.

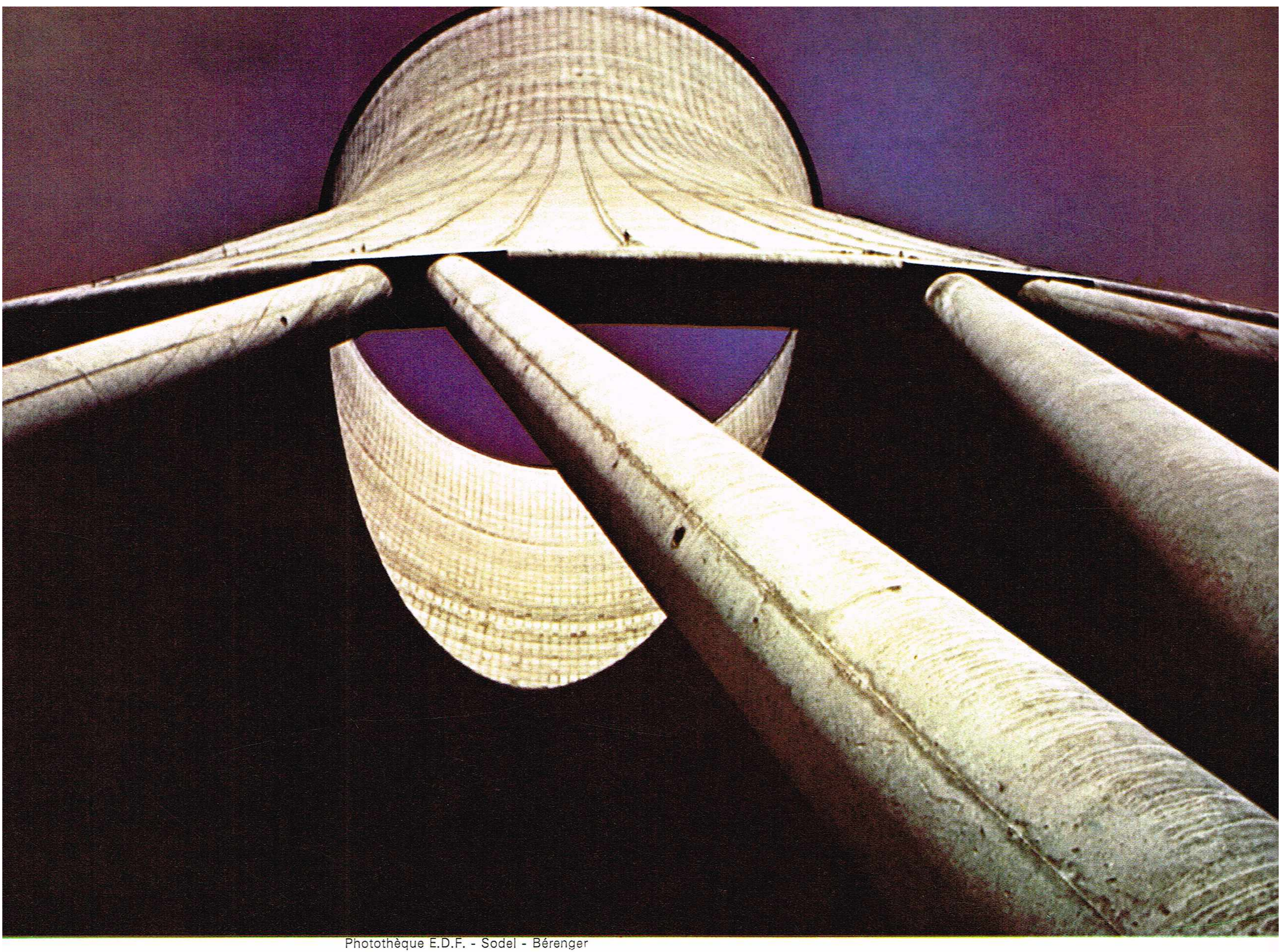
La distance entre les buses d'aspersion est telle que la dispersion doit retomber sur toute la surface du bassin; quelquefois, pour éviter les pertes par entraînement, on entoure le bassin d'une enceinte dont la hauteur est au plus égale à la hauteur maximale des jets de l'aspersion.

Compte tenu des divers paramètres pouvant modifier l'efficacité de refroidissement de tels bassins, il n'existe pas de méthode générale d'étude; plusieurs auteurs ont indiqué les résultats obtenus pour des bassins dans des conditions opératoires bien définies.

— *Bassins de refroidissement*

Lorsque les bassins peuvent avoir de très grandes surfaces, il n'est pas nécessaire de recourir à l'aspersion pour refroidir l'eau, et des bassins creusés dans le sol, de 1,80 m à 3 m de profondeur, permettent de refroidir de l'eau en envisageant une suite de plusieurs bassins. Bien entendu, il est souhaitable que le sol dans lequel sont creusés les bassins soit d'une part imperméable, et d'autre part peu dénivelé.

Pour les bassins à écoulement, de la chaleur est perdue par conduction, convection et rayonnement, mais une quantité non négligeable est gagnée par absorption du rayonnement solaire. La surface des bassins dépend du débit de refroidissement souhaité. On constate que les capacités de refroidissement sont peu affectées par la profondeur du bassin si celle-ci est supérieure à 0,90 m. Pour les épaisseurs plus faibles, la variation de la température de l'eau entre le jour et la nuit est importante. Les performances de refroidissement de ces bassins sont fonction de la température et de l'humidité relative de l'air, de la vitesse des vents, de l'intensité du rayonnement solaire, et, à un degré moindre, de la température du sol et des variations de température et d'humidité de l'air ayant traversé la phase liquide.



Photothèque E.D.F. - Sodel - Bérenger

▲ *Une des tours de réfrigération de la centrale nucléaire du Bugey.*

Pour un bassin donné, on définit la température d'équilibre t_E comme celle où les pertes de chaleur par évaporation sont compensées exactement par l'apport de chaleur dû au rayonnement solaire. La capacité d'un bassin est caractérisée par la différence entre la température d'équilibre et celle de l'eau du bassin.

Bases théoriques du calcul des tours de réfrigération

Compte tenu de tous les paramètres, dont certains climatiques, modifiant les caractéristiques de fonctionnement des bassins de refroidissement et des tours de réfrigération à convection naturelle, la théorie ne peut être envisagée de manière sérieuse que pour les tours à circulation mécanique. La plus fréquemment admise est celle préconisée à l'origine par Merkel (*Ver. Deut. Ing. Forschengsurb*, nº 275, Berlin [1925]). La force motrice qui provoque le transfert est la différence d'enthalpie entre le film gazeux situé au voisinage de l'eau liquide et l'air environnant.

Sous forme intégrale, l'équation de Merkel s'écrit :

(54)
$$\frac{kaV}{L} = \int_{T_{1E}}^{T_{1S}} \frac{dT}{H' - H}$$

où k est le coefficient de transfert convectif, a l'aire spécifique (surface d'échange par unité de volume de colonne), V le volume actif par unité de surface active, L le débit massique d'eau, H' l'enthalpie massique de l'air saturé à la température de l'eau, H l'enthalpie massique de l'air. T_{1E} et T_{1S} désignent les températures de l'air entrant et sortant.

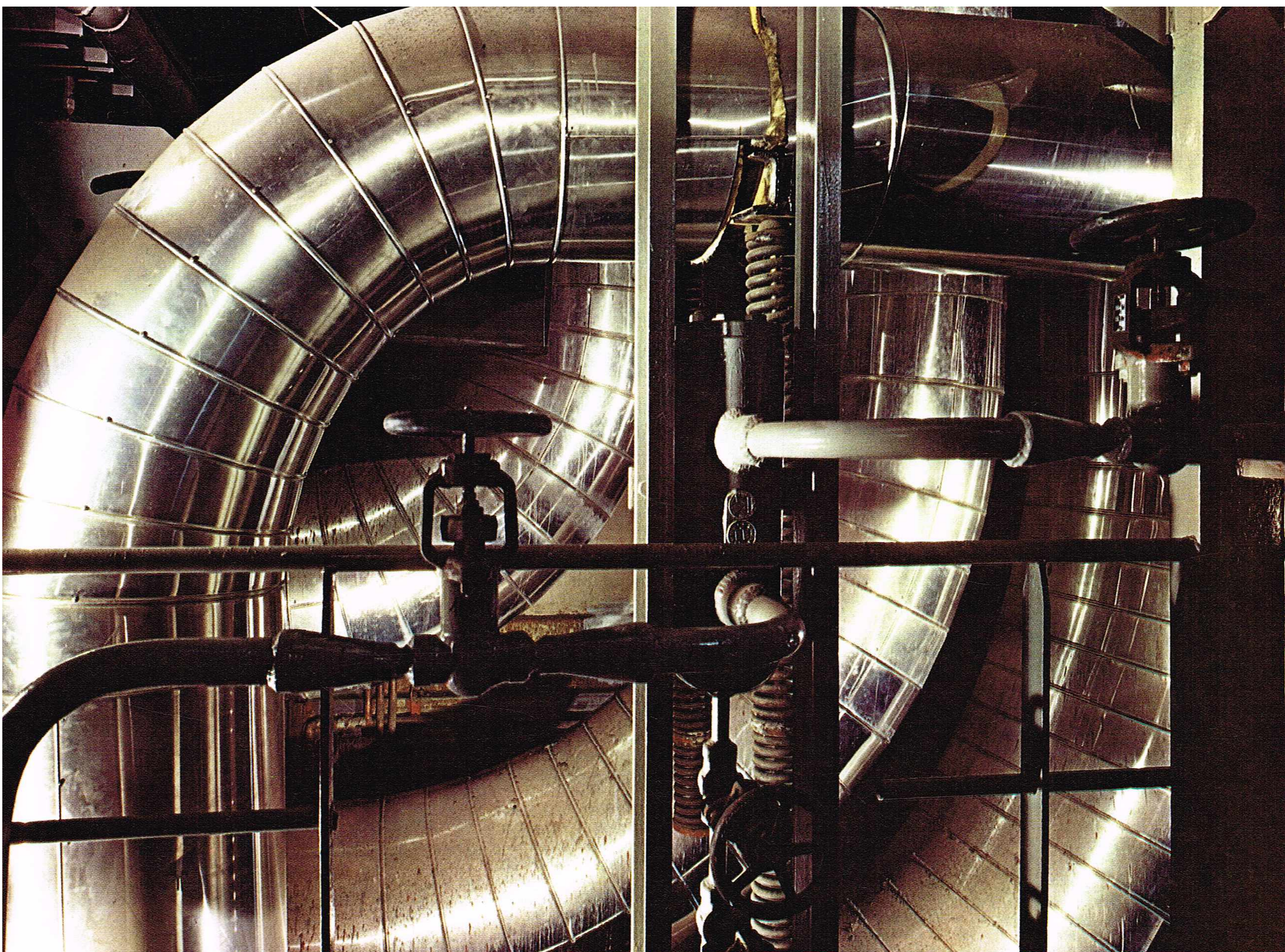
Le membre de droite de **(54)** ne dépend que des propriétés de l'air et de l'eau et est indépendant des caractéristiques géométriques de la tour. Les tours de réfrigération, comme celles d'humidification et de séchage, sont analysées généralement de manière graphique en envisageant un système d'axes où l'on porte en abscisses les températures, et en ordonnées obliques, d'une part l'humidité absolue, et d'autre part les enthalpies rapportées à l'unité de masse d'air sec. Dans ces diagrammes, le bilan enthalpique sur l'air conduit à une courbe sensiblement rectiligne appelée « droite opératoire » dont la pente est égale au rapport L/G. L'intégrale de l'équation **(54)** se calcule alors graphiquement, et sa valeur *(grandeur caractéristique de la tour)* varie en fonction de L/G.

On peut également utiliser une méthode numérique approchée s'inspirant de la méthode de Tchchychef relative au calcul d'intégrale en écrivant que :

(55)
$$\frac{kaV}{L} = \int_{T_{1E}}^{T_{1S}} \frac{dT}{H' - H} \# \frac{T_{1S} - T_{1E}}{4}\left(\frac{1}{\Delta H_1} + \frac{1}{\Delta H_2} + \frac{1}{\Delta H_3} + \frac{1}{\Delta H_4}\right)$$

où H' est l'enthalpie massique de l'air saturé à la température du liquide, et où H représente l'enthalpie massique de l'air à la température humide du gaz,
ΔH_1 la valeur de H' — H à $T_{1E} + 0{,}1\,(T_{1S} - T_{1E})$,
ΔH_2 la valeur de H' — H à $T_{1E} + 0{,}4\,(T_{1S} - T_{1E})$,
ΔH_3 la valeur de H' — H à $T_{1S} - 0{,}4\,(T_{1S} - T_{1E})$,
ΔH_4 la valeur de H' — H à $T_{1S} - 0{,}1\,(T_{1S} - T_{1E})$.

Pour des tours de réfrigération à circulation mécanique, le rapport L/G reste compris entre 0,75 et 1,50 et, par suite, la valeur de la caractéristique varie entre 0,5 et 2,5. Une fois évaluée la valeur de la caractéristique, il faudra concevoir un remplissage de la colonne et une distribution des gaz permettant de se rapprocher de la valeur calculée de la caractéristique. Pritchard (*Performances Curves, Cooling Tower Institute,* Houston [1967]) a donné de nombreux résultats expérimentaux relatifs à divers remplissages des tours, et ses études, ainsi que celles de Baleer et Mart (*Marley Co, Tech. Bull,* R 52, Kansas City), seront très précieuses à tous les utilisateurs de tours de réfrigération.



Photothèque E.D.F. - Sodel - M. Morceau

▲ *Un exemple d'utilisation des ressorts au niveau de la purge de conditionnement de la tuyauterie de vapeur surchauffée de la centrale de la Maxe.*

Transformation d'énergie mécanique en énergie mécanique

Quelle qu'en soit la forme initiale, l'énergie libérée par une source primaire est généralement convertie en énergie mécanique lorsqu'il s'agit de l'utiliser pour la réalisation d'un travail mécanique : la vapeur d'eau met en mouvement une turbine à vapeur, le courant électrique fait tourner un moteur, l'explosion de la poudre propulse un projectile, etc.

Cette énergie mécanique ainsi disponible est transmise, en fonction des besoins, aux organes de la machine qui doit effectuer les opérations souhaitées par l'utilisateur. Elle doit être adaptée au type de travail à réaliser ; l'intensité des efforts qu'elle est susceptible de fournir doit être contrôlée.

Ce transfert d'énergie, ou plus exactement sa transformation, s'effectue par l'intermédiaire d'éléments mécaniques qui assurent la liaison entre le « moteur » source d'énergie et les organes actifs de la machine.

Nous étudierons dans ce qui suit la fonction de ces éléments et la façon dont ils doivent être employés.

Ressorts

Les ressorts sont des organes mécaniques élastiques étudiés pour supporter l'application d'une charge P ou d'un couple C et se déformer sous l'action de ces charges pour reprendre leur position initiale lorsque cesse l'application de la charge.

C'est l'*élasticité apparente* qui distingue les ressorts des autres éléments mécaniques dont la rigidité est beaucoup plus importante.

Les ressorts permettent une grande déformation (la flèche *f*), pour une même charge P, ou une grande rotation θ pour un même couple C.

Pendant leur déformation, les ressorts emmagasinent une quantité d'énergie $W = \frac{1}{2} Pf$ ou $W = \frac{1}{2} C\theta$, qui sera restituée. C'est une énergie potentielle élastique. Les ressorts, grâce à la valeur relativement importante de leur déformation *f* ou θ, sont capables de transformer l'énergie cinétique en énergie potentielle élastique. C'est le cas par exemple des ressorts de suspension des véhicules terrestres. Les roues sont liées au châssis des véhicules par des éléments élastiques qui absorbent l'énergie cinétique due au choc des roues sur les différents défauts du revêtement ; les ressorts modifient leur position à l'instant du choc, pour ensuite reprendre leur état d'origine en transmettant un minimum d'énergie cinétique aux passagers ou à la charge du véhicule.

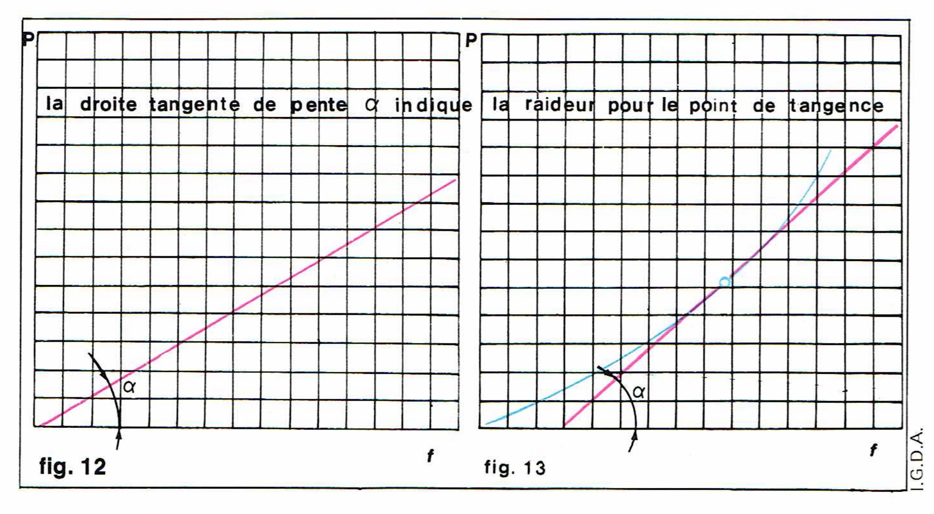
La modification brutale de l'état d'énergie du ressort entraîne des vibrations, d'autant plus que le véhicule est une masse libre qui va osciller pour une durée infinie après modification brutale de la position ; les ressorts sont alors accompagnés d'amortisseurs visqueux ou à friction sèche qui ont pour but de limiter le nombre d'oscillations du couple ressort-masse suspendue.

Imaginons un véhicule sans ressorts de suspension, ce qui serait bien entendu peu confortable sur nos véhicules habituels. L'énergie cinétique à l'instant du choc serait transmise intégralement à la masse du véhicule, les déformations des pièces de liaison étant alors très faibles, les efforts développés prendraient des valeurs très importantes, ce qui nécessiterait des éléments de section importante pour ne pas rompre.

Les ressorts ont pour buts principaux d'absorber les chocs et d'emmagasiner de l'énergie ; éventuellement, ils améliorent le confort par leur grande déformation.

Caractéristiques des matériaux pour ressort

La caractéristique prédominante des matériaux pour ressort est de conserver un comportement élastique durable pour des contraintes élevées. Pour les ressorts fabriqués



▲ *Figure 12 et 13 : représentation graphique de la variation de la flèche f en fonction de la charge P d'un ressort; pour le ressort de la figure 12, la rigidité est constante; pour celui de la figure 13, elle est variable.*

▶ *A droite et page ci-contre à gauche, figures 18 et 19; fig. 18 : ressort de flexion dans sa forme géométrique la plus simple; fig. 19 : ressort de flexion à contrainte « constante »; pour ce dernier, la largeur b varie linéairement en fonction de x.*

▼ *Figures 14, 15, 16 et 17 : représentation de la variation de la flèche f en fonction de la charge P, pour différents types de ressort; fig. 14, ressort en hélice cylindrique appelé aussi ressort à boudin, ressort à lames; fig. 15, ressort en hélice cylindrique à pas variable, ressort conique; fig. 16, rondelles coniques ou Belleville; fig. 17, ressort en spirale d'Archimède.*

à froid, les aciers fins pour traitements thermiques ou les aciers corde à piano sont les plus courants, ou les bronzes au phosphore ou au béryllium, ou l'acier inoxydable du type 18/8 (18 % de chrome, 8 % de nickel) lorsqu'il est nécessaire d'obtenir un matériau peu oxydable. Lorsque les ressorts sont fabriqués à chaud, on emploie couramment des aciers au silicium ou au chrome-silicium-molybdène, ou encore au chrome-vanadium; quelquefois, on utilise un acier à 10 % de tungstène si le ressort doit être utilisé à haute température (ne dépassant pas 500 °C toutefois).

Les ressorts seront dans tous les cas trempés après fabrication. Les ressorts bronze ou Inox sont réalisés avec un métal écroui.

La *propriété d'élasticité durable* est donnée par la stabilité du *module d'élasticité longitudinale* E ou *module de Young* et du *module transversal* G. Ces caractéristiques seront utilisées dans les calculs. Leurs valeurs moyennes sont :

— pour les aciers à ressorts : E = 220 000 N/mm², G = 80 000 N/mm²;

— pour les bronzes à ressorts : E = 120 000 N/mm², G = 45 000 N/mm².

Il est nécessaire d'utiliser des matériaux parfaitement élaborés et d'une constance de qualité aussi bonne que possible. Les aciers pour ressort supportent des contraintes d'extension pouvant atteindre 2 000 N/mm². Il est nécessaire d'utiliser le métal au plus près possible de ces qualités limites pour obtenir un rapport énergie emmagasinée/kg de poids de métal le plus élevé possible, mais pour cela la dispersion des caractéristiques doit être la plus faible possible, et le taux de travail sera d'autant plus près du taux de rupture que la dispersion de qualité sera faible.

Différents modes d'action

Le mode de sollicitation est différent d'un ressort à l'autre. Les trois cas principalement rencontrés sont les ressorts de flexion, de torsion, et de traction ou compression.

Il existe une multitude de pièces à effet ressort, de formes aussi diverses que l'on peut imaginer, chaque forme s'adaptant à un usage bien défini et quasi impossible à adopter pour un usage différent. Ces ressorts peuvent parfois être calculés, mais les essais sont souvent nécessaires.

Les calculs de projet ou d'avant-projet d'un ressort quelconque comprennent la détermination des contraintes dans le métal, mais aussi la détermination de la rigidité du ressort qui est la relation liant la charge appliquée à la flèche prise par le ressort.

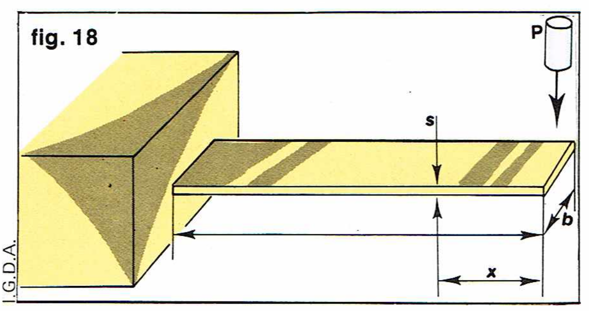
Dans certaines limites (*fig.* 12), on peut dire que la rigidité d'un ressort est constante. En portant en ordonnée la charge appliquée P et en abscisse la flèche *f* sur un diagramme orthonormé, la courbe obtenue est rectiligne, ce qui peut se traduire par : la flèche est directement proportionnelle à la charge appliquée.

Un contre-exemple est donné par la *figure* 13. La charge croît plus vite que la flèche; la courbe est concave vers le haut.

Si on appelle K la rigidité d'un ressort définie comme étant le rapport de la charge P par la flèche *f*, on peut dire que $K = P/f = \operatorname{tg}\alpha$.

La rigidité représente la pente en un point quelconque de la courbe P, *f*.

Pour la courbe de la *figure* 12, la rigidité est constante, par contre, pour la courbe de la *figure* 13, elle est variable



et a pour valeur $\frac{dP}{df}$, qui représente la pente de la tangente à la courbe en un point donné.

Par exemple, pour les principaux ressorts utilisés en construction mécanique, les courbes caractéristiques ont l'allure des *figures* 14, 15, 16, 17.

Parfois, on utilise un vocabulaire différent pour parler de ressorts et on utilise le vocable *flexibilité* qui est tout simplement l'inverse de la rigidité : flexibilité $= \frac{1}{K} = \frac{f}{P}$

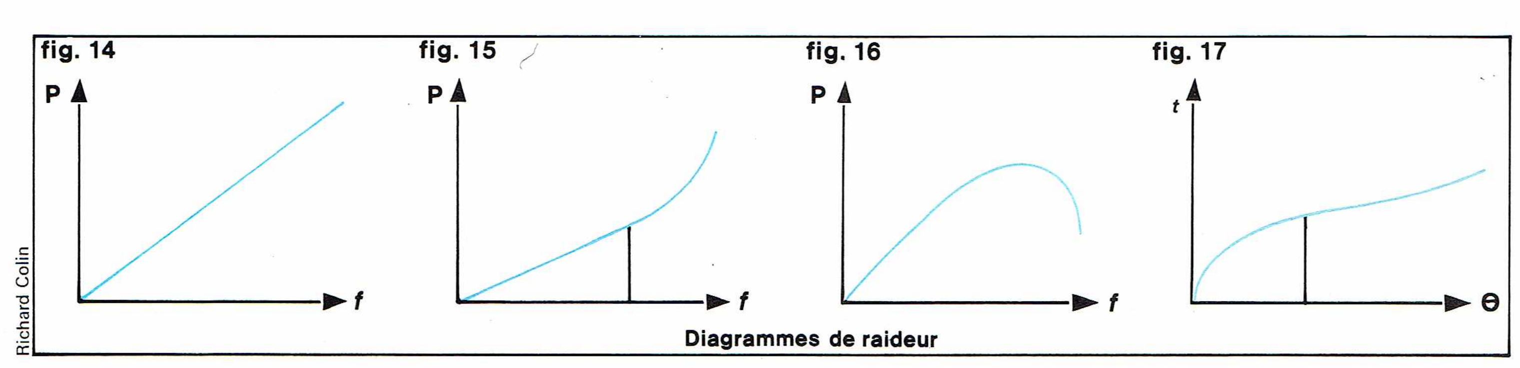
Ressorts de flexion

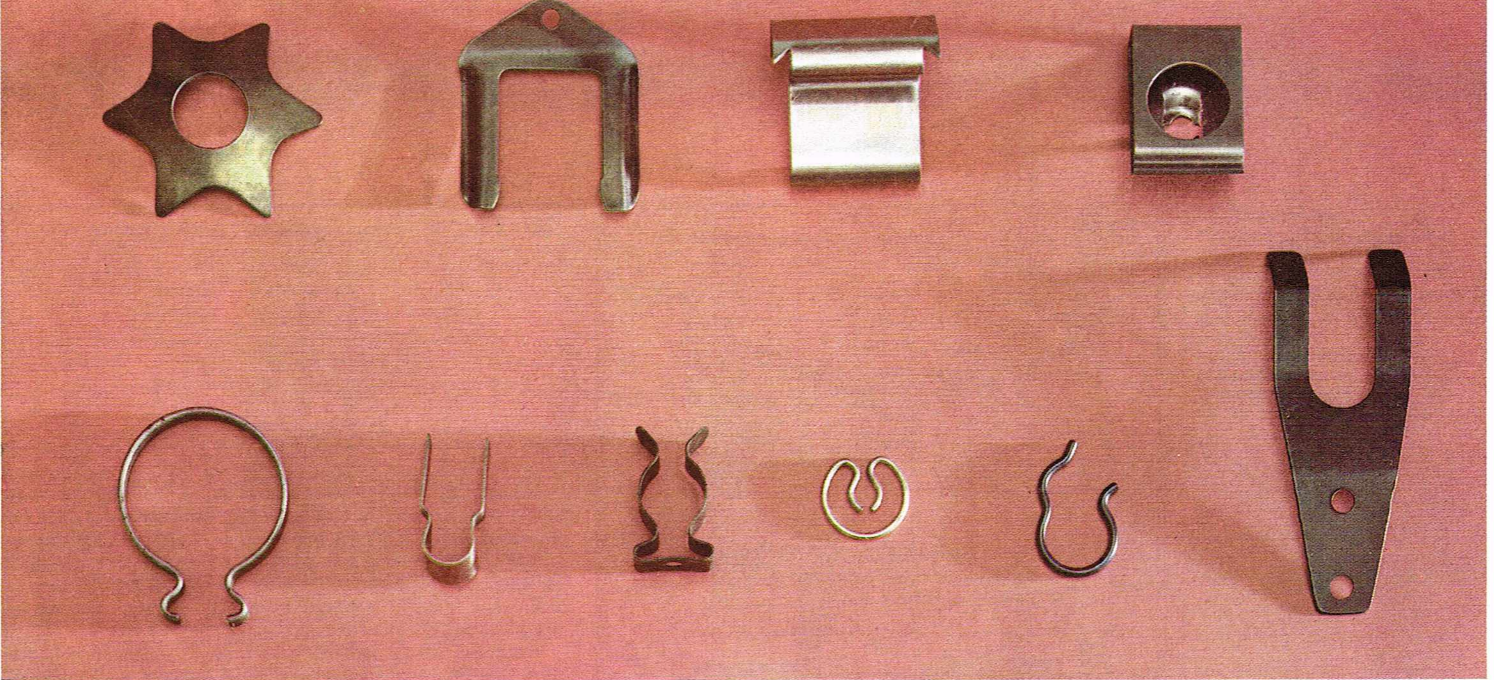
La forme la plus simple du ressort de flexion consiste en une lame, d'épaisseur *s* et de largeur *b* uniforme, encastrée à une extrémité et supportant une charge concentrée P à l'autre extrémité (*fig.* 18).

La contrainte d'extension σ en un point situé à la distance *x* de l'extrémité et à la surface de la lame est :

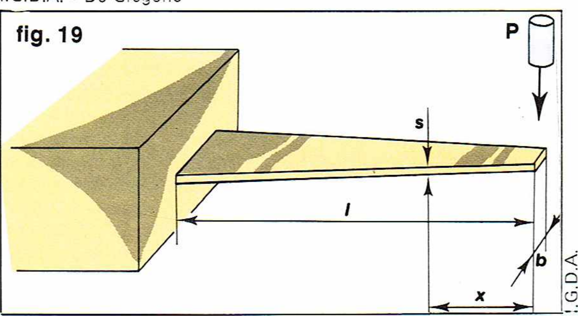
$$\sigma = 6\,\frac{Px}{bs^2}$$

La contrainte varie théoriquement de 0 pour $x = 0$ sous la charge à un maximum $\sigma = 6\,\frac{Pl}{bs^2}$ au voisinage de l'encastrement, pour $x = 1$. La contrainte n'est pas uniforme si la lame a une largeur constante; le métal est donc mal utilisé. Conservons une lame d'épaisseur *s* constante; pour avoir une bonne utilisation du métal, il faut obtenir une contrainte constante dans la longueur de la lame; sa largeur doit être donnée par :





I.G.D.A. - De Gregorio



$$b = \frac{6\,P}{\sigma s^2}x$$

σ et s sont constants. La relation est de la forme $b = ax$ qui est l'équation d'une droite de pente x dans un repère cartésien, ce qui veut dire que la lame doit avoir une forme triangulaire (*fig.* 19).

La largeur à l'encastrement n'est pas modifiée, mais la largeur sous la charge est nulle. La lame a donc une masse moitié de celle de la lame rectangulaire. Pour le métal, il n'y a pas de problème de tenue, car la contrainte maximale n'a pas augmenté, elle est tout simplement maximale dans tout le métal. Cette disposition est intéressante ; elle économise le métal de haute qualité et, de plus, permet un gain de poids (sur un véhicule par exemple).

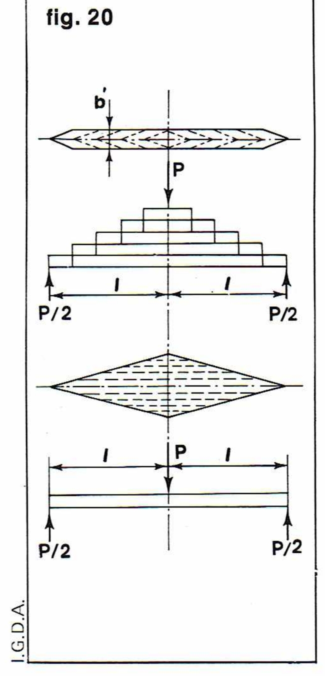
La lame atteint pourtant une largeur b à l'encastrement très importante, ce qui ne facilite pas sa mise en place, surtout sur véhicule.

Il n'y a pas de contrainte transversale dans ce genre de ressort ; on peut donc imaginer une solution où la lame triangulaire d'origine est découpée en n bandes de largeur b' qui seront superposées (*fig.* 20) telles que $nb' = b$. Pour obtenir ce paquet de lames, il est bien plus simple de découper dans une bande de métal des longueurs différentes pour constituer chaque lame. Le ressort ainsi constitué doit former un tout, tel que les lames ne puissent pas s'échapper ou pivoter pendant l'utilisation; des étriers de liaison où rainures et bossage sont prévus (*fig.* 21).

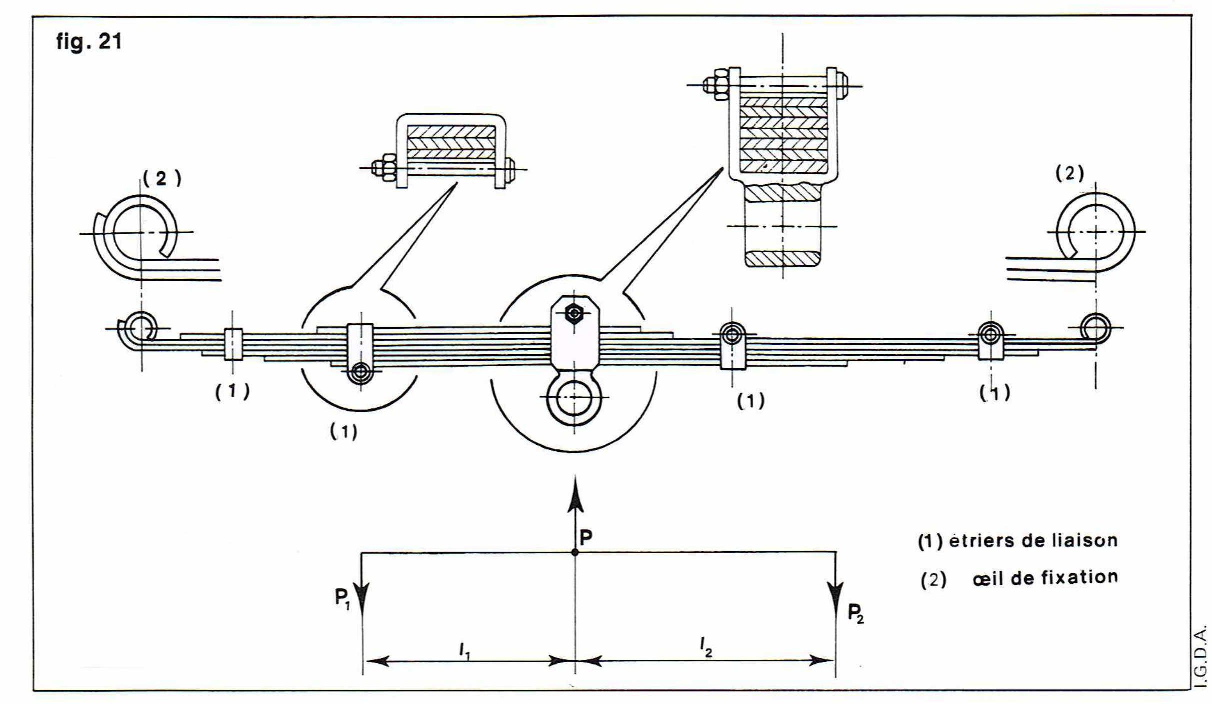
La lame la plus longue, ou lame maîtresse, a ses extrémités recourbées pour former un œil de fixation (*fig.* 21, 22). Les extrémités de la lame sont fixées en d sur le châssis b par une chape et en e par une jumelle qui permet à l'une des extrémités de suivre les déformations du ressort ou les variations de flèche lors des variations d'effort (*fig.* 22-1).

Le ressort est monté sur Silentbloc (*fig.* 22- 2 et 3) formé de deux tubes concentriques d'acier entre lesquels est vulcanisé du caoutchouc, ce qui amortit les vibrations en évitant de les transmettre au châssis. Le Silentbloc est introduit dans l'œil du ressort et traversé par un boulon h de liaison à la jumelle. Le montage de la jumelle sur le support b est identique et réalisé par le boulon g.

Parfois, un système mixte est utilisé : une extrémité est formée en boucle, l'autre extrémité est droite et glisse sur le support.

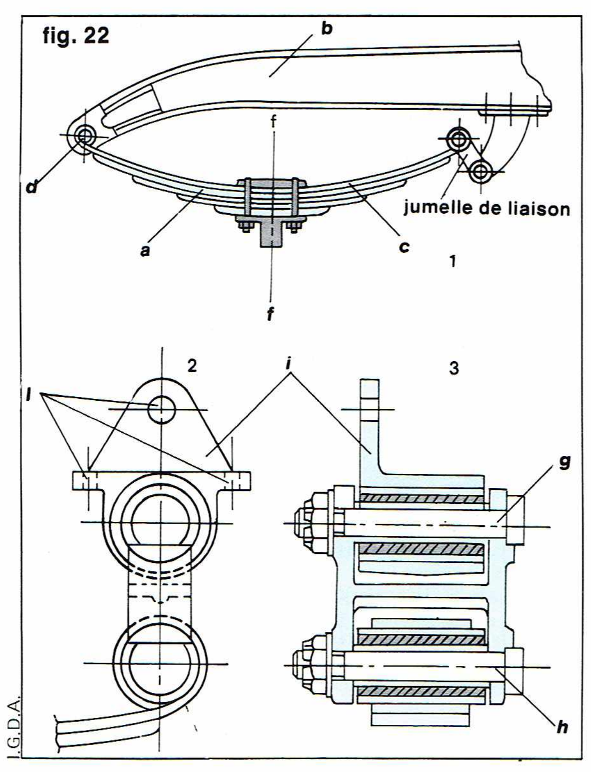


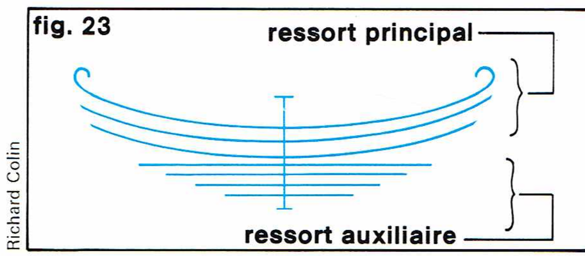
▲ ***En haut, différents types de ressort de flexion. Ci-dessus, figure 20 : en haut, ressort de suspension en lames superposées obtenu par le découpage théorique du losange en bas.***



◀ ***Figure 21 : un ressort à lames, ses étriers de liaison et ses systèmes de fixation.***

▶ *Figure 22 : 1) montage d'un ressort à lames avec jumelle de liaison ; 2 et 3) détail du montage sur le Silentbloc. Figure 23 : ressort à double flexibilité utilisé pour les véhicules poids lourds.*





Beaucoup de ressorts à lames ont une lame maîtresse renforcée ; dans ce cas, la lame la plus longue est doublée. En effet, nous n'avons pas tenu compte de l'effort tranchant qui provoque des contraintes de cisaillement dans la lame. La rupture se produit toujours au niveau d'un point de fixation externe quand la lame maîtresse est simple (*fig.* 22-2).

Pour les poids lourds, une telle suspension est, bien sûr, calculée à charge maximale du véhicule. En circulation à vide, il se produit un sautillement du camion dû à une trop grande raideur des ressorts en cas de charge faible. Il n'est pas possible d'utiliser des ressorts de moindre raideur satisfaisants pour le fonctionnement à vide ; dans ce cas, l'ensemble chargé aurait une fâcheuse tendance à balancer au moindre virage.

Pour remédier à ces inconvénients, des ressorts à double flexibilité sont utilisés (*fig.* 23). Le ressort principal est utilisé en permanence, le ressort auxiliaire n'entrant en action qu'en charge.

Ressorts de torsion

Barre de torsion

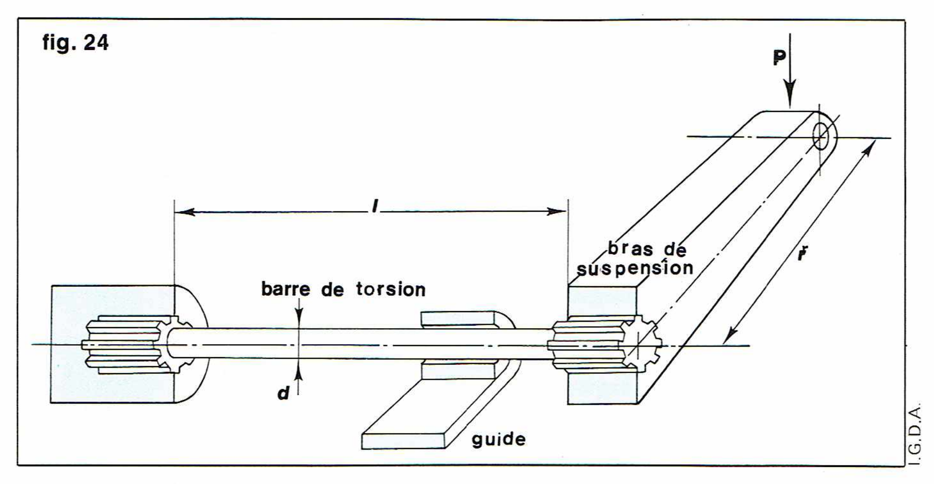
Un type de ressort très à la mode en construction automobile est la barre de torsion, constituée par une barre aux extrémités souvent cannelées, dont l'une est encastrée dans un support lié au châssis et l'autre dans le bras porte-roue (*fig.* 24). Un guide complémentaire est prévu afin que la barre soit soumise à la torsion « pure » sans flexion.

Si P est la force appliquée perpendiculairement à l'extrémité du bras de suspension et r le rayon du bras, la contrainte tangentielle à la périphérie de la barre est $\tau = \frac{16}{\pi}\frac{\mathcal{M}}{d^3}$ où $\mathcal{M} = pr$, moment de torsion du couple. Dans la relation de contrainte, la nature du matériau et la longueur de la barre n'interviennent pas. La déformation de la barre, ici l'angle relatif de rotation d'une extrémité par rapport à l'autre, est :

$$\theta = \frac{32}{\pi}\frac{\mathcal{M}l}{Gd^4} = \frac{2\,l}{Gd}\tau$$

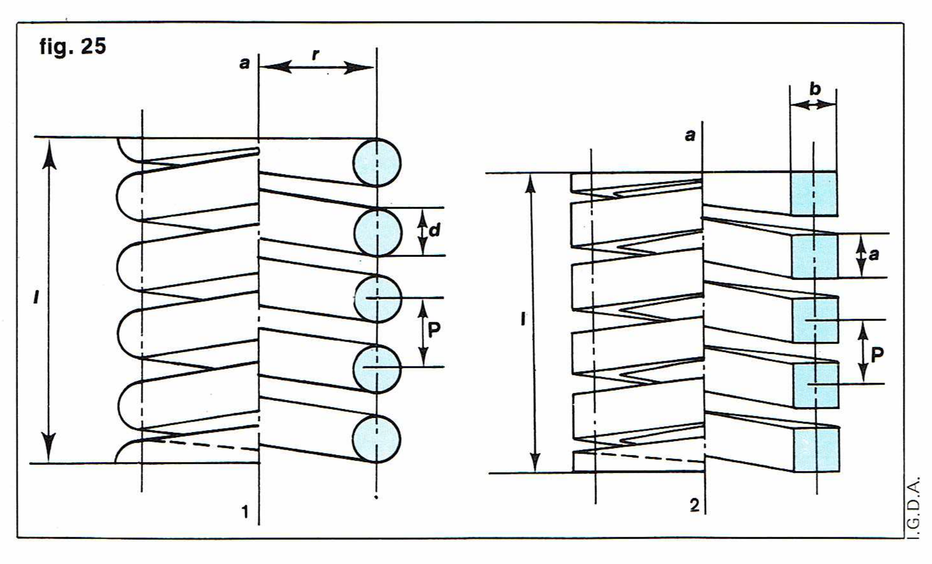
L'encombrement de ce ressort est faible, ou du moins sa forme permet de le placer sous le châssis.

Une autre technique consiste à enrouler cette barre en hélice cylindrique pour constituer un ressort de forme différente qui est le *ressort à « boudin »*.



▲ *Figure 24 : ressort de torsion à axe droit, souvent appelé barre de torsion.*

▼ *Figure 25 : ressort de torsion en hélice cylindrique à fil rond (1) ou à fil carré (2).*



Ressort en hélice cylindrique à pas P constant

Ce ressort est un cas particulier de barre de torsion ; le fil, comme la barre d'ailleurs, peut être à section carrée, ou rectangulaire. La notation adoptée sur la *figure* 25 permet de calculer la contrainte :

$$\tau = \frac{16\,pr}{\pi d^3} \quad \text{pour fil rond}$$

ou

$$\tau = \frac{pr}{0{,}21\,a^3} \quad \text{pour fil carré}$$

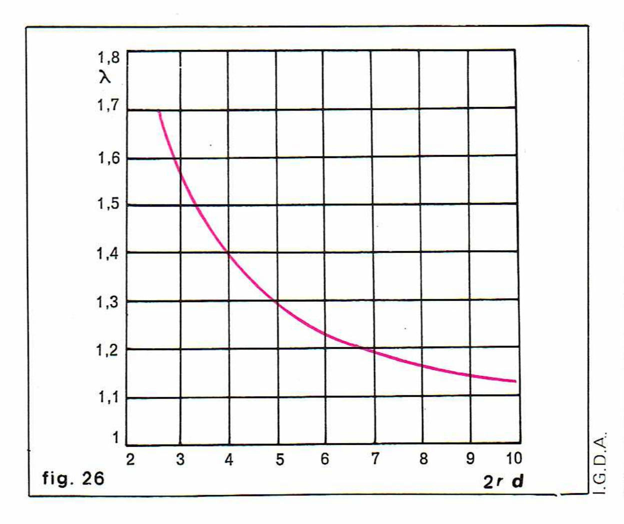
La déformation angulaire θ peut ici être transformée en déformation rectiligne suivant l'axe *a-a* d'enroulement du ressort et traduite par la flèche f, telle que :

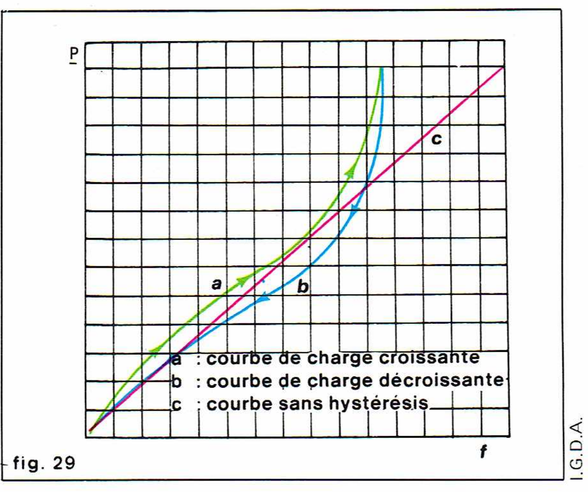
$$f = \frac{pnr^3}{Gd^4} \quad \text{pour fil rond}$$

ou

$$f = \frac{5{,}6\,pnr^3}{8\,Ga^4} \quad \text{pour fil carré}$$

n étant le nombre de spires actives du ressort. La longueur de fil utile est sensiblement $l = 2\,\pi rn$, longueur équivalente à celle de la barre de torsion.





◀ ***Figure 26 :** courbe représentative du coefficient multiplicateur de correction de contrainte λ en fonction du rapport 2 r/d pour un ressort de torsion en hélice cylindrique.*
***Figure 29 :** diagramme d'hystérésis d'un ressort caoutchouc.*

* *Construction des ressorts en hélice*

Ce type de ressort doit respecter certaines dispositions constructives. Le rapport du diamètre d'enroulement par rapport au diamètre du fil est généralement compris entre 6 et 16 ; un rapport inférieur entraîne une augmentation importante de la contrainte par rapport à celle calculée ; le coefficient multiplicateur de correction est λ (*fig.* 26). Les extrémités des ressorts doivent être préparées pour recevoir convenablement la charge p ; les ressorts recevant une charge de compression ont la dernière spire de chaque extrémité meulée pour former une surface plane ; la charge est ainsi appliquée sensiblement dans l'axe du cylindre d'enroulement. Les ressorts recevant des charges en traction ont la dernière spire formant anneau ou crochet de fixation (*fig.* 27). Dans la détermination de la longueur du ressort, on tient compte des dernières spires meulées en ajoutant 1 à 2 spires à chaque extrémité.

$$n_{totales} = n_{utiles} + 2 \text{ à } 4$$

Dynamique des ressorts

La fréquence propre de vibration d'un ressort chargé est :

$$f_0 = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{f}}$$

où f_0 est la fréquence en hertz, T la période en secondes, g l'accélération de la pesanteur et f la flèche de ressort, qui peut s'exprimer d'une autre manière, en mesurant la flèche en centimètres (valeurs courantes des flèches) par

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1\,000}{f}} \simeq \frac{5}{\sqrt{f}}$$

Un calcul rapide des vibrations des ressorts peut être effectué à partir de cette formule qui permet en particulier de déterminer si la fréquence propre du ressort correspond ou non à la fréquence de la variation de l'effort appliqué. Lorsque les deux fréquences correspondent sensiblement, il se produit un phénomène de résonance et le ressort bat d'une manière différente de celle qui correspond à la charge, si bien qu'il lui est impossible de remplir son rôle de ressort.

Dans tous les cas d'effort dynamique, ce calcul de vérification est fait et oblige parfois à introduire un second ressort qui modifie la fréquence propre de vibration. C'est le cas, par exemple, des ressorts de soupapes pour moteurs très rapides. Deux ressorts concentriques d'hélice inverse et de flèches différentes sont montés, ce qui permet d'éloigner la zone dite « d'affolement de soupape ».

Ressorts particuliers : ressorts caoutchouc

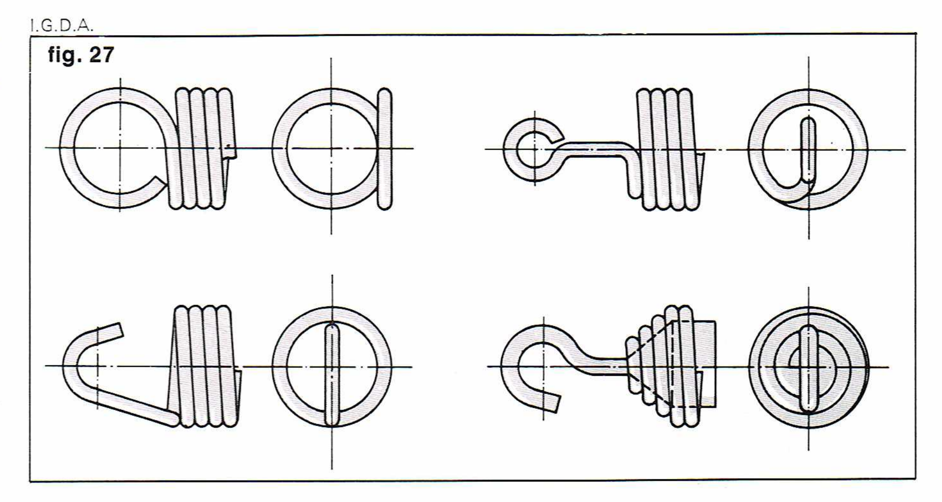
Les éléments en caoutchouc sont très souvent utilisés en construction mécanique pour leurs propriétés élastiques d'une part et d'hystérésis d'autre part.

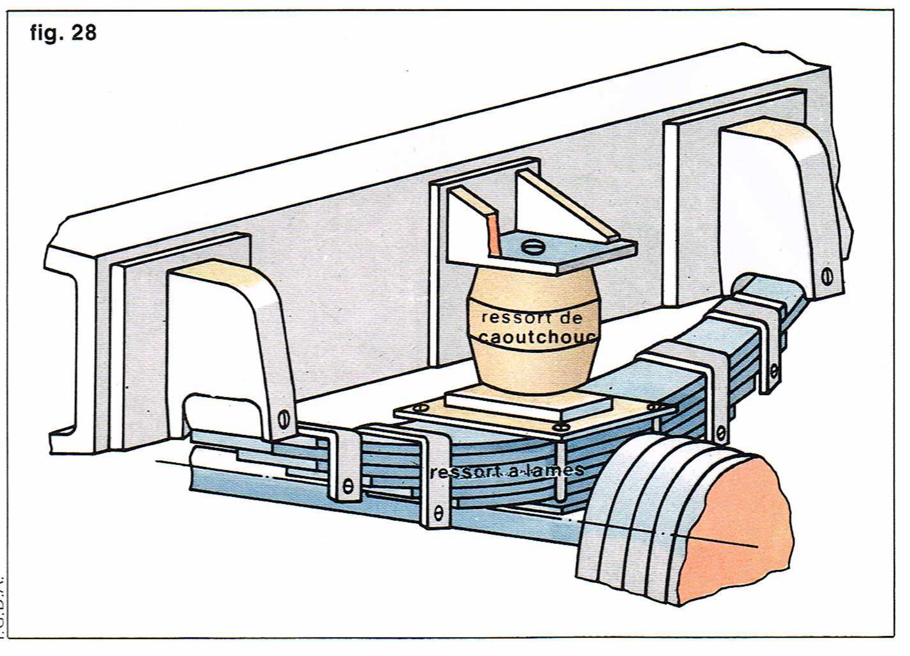
De plus, les blocs caoutchouc sont moulés, ce qui permet de leur donner des formes particulières permettant des rigidités diverses, lesquelles fluctuent, en outre, pendant l'utilisation, selon la flèche imposée : on a alors des éléments à raideur variable. C'est le cas, par exemple, des *butées de suspension* de forme sensiblement conique sur lesquelles prennent appui les bras de suspension en fin de course, ce qui évite le choc brutal à ce moment, ou, comme sur la *figure* 28, du *limiteur de flèche* des ressorts à lames.

Le comportement du caoutchouc est différent en traction et en compression, la contrainte maximale admissible en compression étant nettement plus importante qu'en extension. C'est pourquoi ces éléments ne sont pratiquement jamais utilisés en traction.

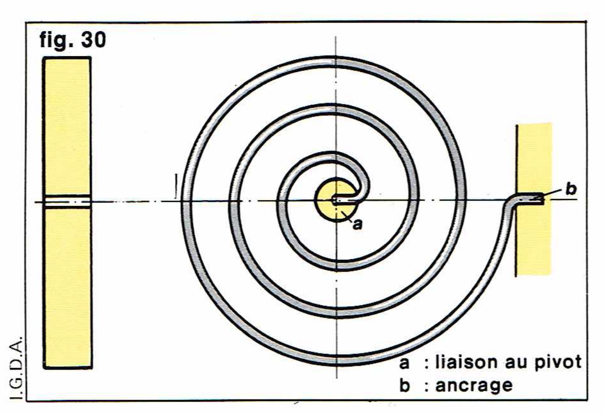
La *figure* 29 illustre le comportement d'un bloc caoutchouc : en *c*, courbe de raideur constante, en *a*, courbe

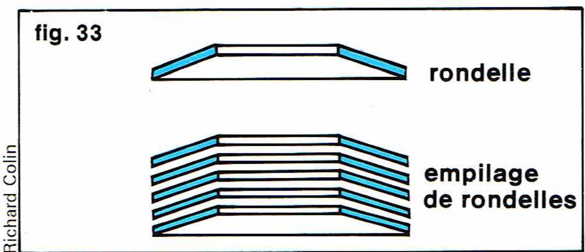
▼ ***Figure 27 :** spires d'extrémité pour fixation de différents ressorts.*
***Figure 28 :** ressort caoutchouc limiteur de flèche pour ressort à lames.*

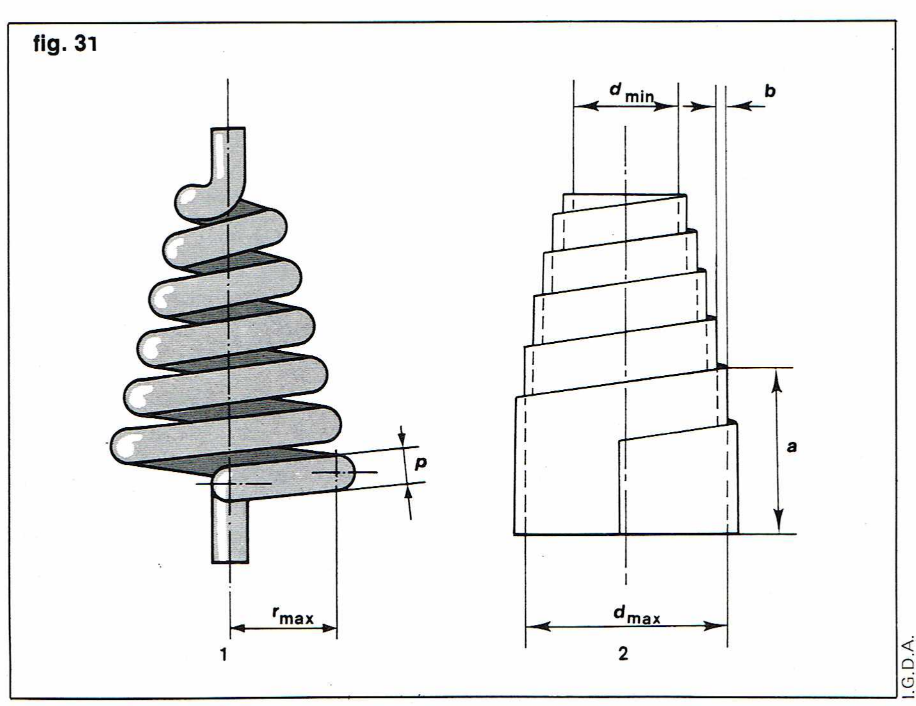


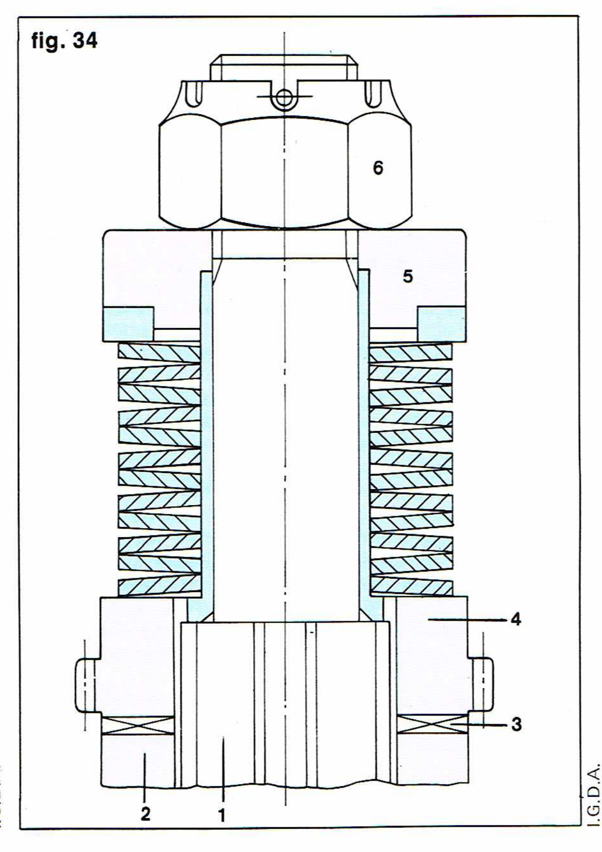


▶ *Figure 30 : un ressort spiral. De tels ressorts de flexion sont employés dans toute l'industrie horlogère (horlogerie mécanique). Figures 32 et 33 : empilage de disques coniques ; pour une même valeur de la charge, la flèche diminue (cas fig. 33), ou augmente (fig. 32).*



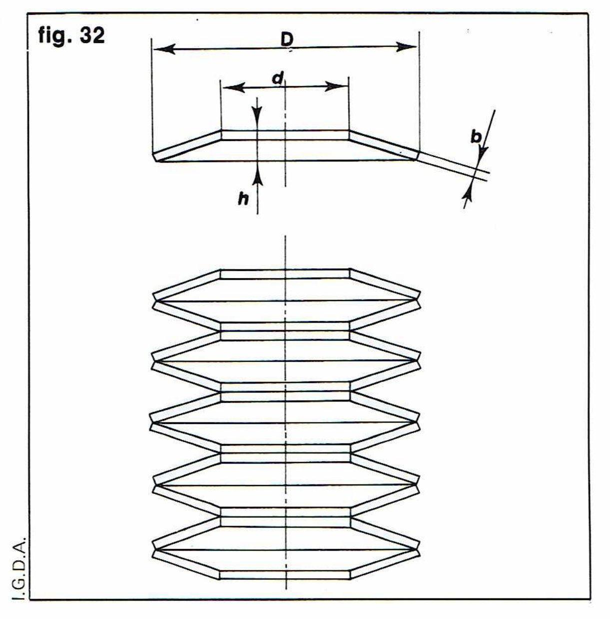






▲ *Figure 31 : ressorts en hélice conique ; 1) à fil rond ; 2) à fil rectangulaire. Figure 34 : application des rondelles Belleville à un limiteur de couple (voir développement dans le texte).*

de charges croissantes et en *b*, courbe de charges décroissantes. La différence entre *a* et *b* correspond à la dispersion d'énergie représentant l'amortissement à l'intérieur du bloc, qui s'échauffe d'ailleurs en fonctionnement dynamique. Les éléments caoutchouc sont sensibles aux hydrocarbures, ils doivent en être bien protégés.



▶ *Figure 32 : voir légende en haut de page.*

Autres ressorts

D'autres types de ressorts sont couramment employés, par exemple le *ressort spiral* (*fig.* 30) employé dans toute l'horlogerie mécanique ; c'est un ressort de flexion. Une extrémité de la lame est enroulée sur un axe, l'autre est maintenue sur le boîtier. Ce système est utilisé aussi pour les stores de fenêtre afin de compenser le poids de la partie déroulée du store. En général, ce ressort est constitué d'une bande de métal, plus rarement d'un fil rond.

Un *ressort à hélice conique* (*fig.* 31) est souvent utilisé dans les tampons de wagon de chemin de fer. Il présente l'avantage d'une raideur croissante avec l'augmentation de flèche ; il est toujours utilisé pour des efforts de compression suivant l'axe d'enroulement.

La *rondelle Belleville* très employée en mécanique dans différents systèmes de réglage est constituée d'une simple rondelle conique en acier à ressort (*fig.* 32).

Chaque rondelle de dimensions données a sa propre courbe de raideur ; cependant, suivant l'empilage qui est fait, il est possible pour *n* rondelles, par exemple, assemblées comme sur la *figure* 32, d'obtenir une flèche totale *nf* pour la même charge axiale P, ou au contraire, comme sur la *figure* 33, d'obtenir une flèche *f*/*n* pour la même charge P, ce qui permet des combinaisons intéressantes pour résoudre les problèmes de réglage ; les dimensions vont d'un diamètre extérieur de 10 à 800 mm. Ces éléments sont couramment en acier au manganèse-silicium ou chrome-vanadium ou en bronze.

L'exemple de la *figure* 34 illustre un montage de limiteur de couple. L'arbre central (1) porte la pièce cannelée (2) qui transmet le couple au pignon (4) à alésage lisse par l'intermédiaire de dents frontales (3) obliques. Le contact entre les pièces (2) et (4) est assuré par l'en-

semble des rondelles Belleville, maintenues comprimées partiellement par la rondelle (5) et l'écrou à créneaux (6). Lorsque le couple atteint la valeur critique, les pièces à dents frontales s'écartent progressivement l'une de l'autre; l'effort dû aux rondelles augmente sensiblement jusqu'au moment où, le couple ayant augmenté, les dents sautent de leur encoche. En plus de la sécurité mécanique automatique, un tel système, très sonore, prévient l'opérateur que la limite a été atteinte.

Chaînes

Les chaînes pour applications mécaniques sont utilisées pour transmettre la puissance d'un arbre à un autre qui lui est parallèle; l'exemple de la bicyclette est bien connu. La chaîne est utilisée dans le cas où la distance entre axes est importante, ce qui évite une multitude d'engrenages ou des engrenages de dimensions importantes. Citons la chaîne de distribution du moteur qui entraîne l'arbre à cames en tête à partir du vilebrequin.

Différents types de chaînes

La chaîne la plus simple est la *chaîne Galle* (*fig.* 35) dont les maillons sont formés par des lames parallèles droites ou évidées, assemblées par des axes rivés mais pouvant tourillonner. Le nombre de lames peut varier. On aura des chaînes à 2, 3 ou 4 mailles si, de chaque côté, il y a 2, 3 ou 4 lames assemblées. Ces chaînes conviennent pour les transmissions de puissance à faible vitesse linéaire : de 0,25 à 0,8 m/s. Il y a frottement des mailles sur les axes et ceux-ci, qui ne peuvent pas être trempés, s'usent rapidement. Le rendement est assez médiocre, $\eta = 0{,}8$. On utilise ces chaînes surtout comme chaînes de manutention.

Un modèle plus perfectionné est obtenu en introduisant un tube sur chaque axe de la chaîne précédente. On en obtient un autre encore plus perfectionné en entourant ce tube ou douille d'un deuxième cylindre, le faux rouleau, pour obtenir une *chaîne à rouleaux* (*fig.* 36). Toutes les pièces peuvent être en acier dur cémenté, trempé, ou en acier au nickel-chrome.

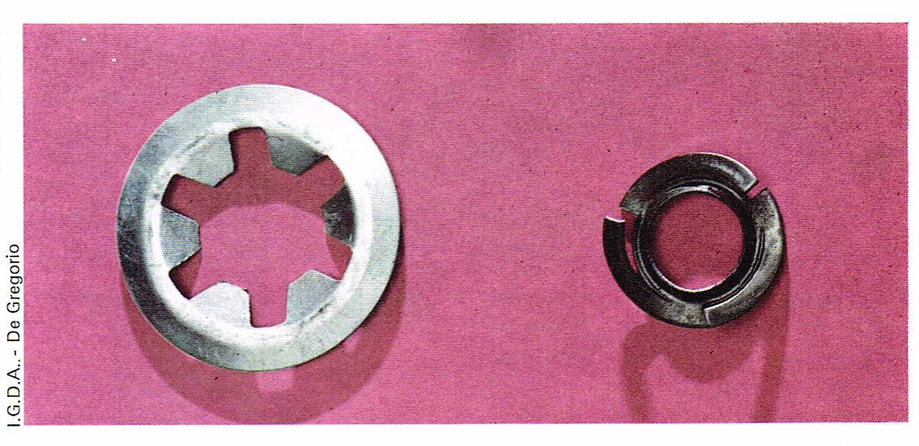
Cette disposition permet des vitesses rapides pouvant atteindre 8 à 11 m/s suivant le pas de la chaîne. Pour les charges importantes, il n'est pas possible, comme pour la chaîne Galle, de placer plusieurs mailles, mais on dispose parallèlement plusieurs chaînes assemblées par le même axe (*fig.* 37).

Une amélioration intéressante est obtenue avec la *chaîne silencieuse* qui, comme son nom l'indique, est moins bruyante que les précédentes. La partie active n'est plus l'axe de chaque maillon mais des dents portées par les mailles. Ce type de chaîne a un contact doux sur les roues (*fig.* 38 et 39) et permet des vitesses linéaires de 20 m/s.

Avec les types précédents, il faut 2 sortes de maillons, ce qui pose parfois un problème de fermeture de la chaîne. Il existe un type de chaîne, où les maillons sont tous identiques, avec laquelle il n'y aura pas de problèmes de fermeture : c'est la *chaîne à maillons coudés* (*fig.* 40).

Rapport de transmission

Une première condition de calcul sera de respecter l'impossibilité d'utiliser des roues de moins de 8 dents et de s'en tenir aux limites maximales de vitesse citées précédemment par type de chaîne. Des vitesses plus importantes entraînent une usure prématurée des chaînes et des roues par chocs au moment du contact, et, de plus, l'effort centrifuge, qui atteint des valeurs importantes, entraîne une surtension trop grande des chaînes.

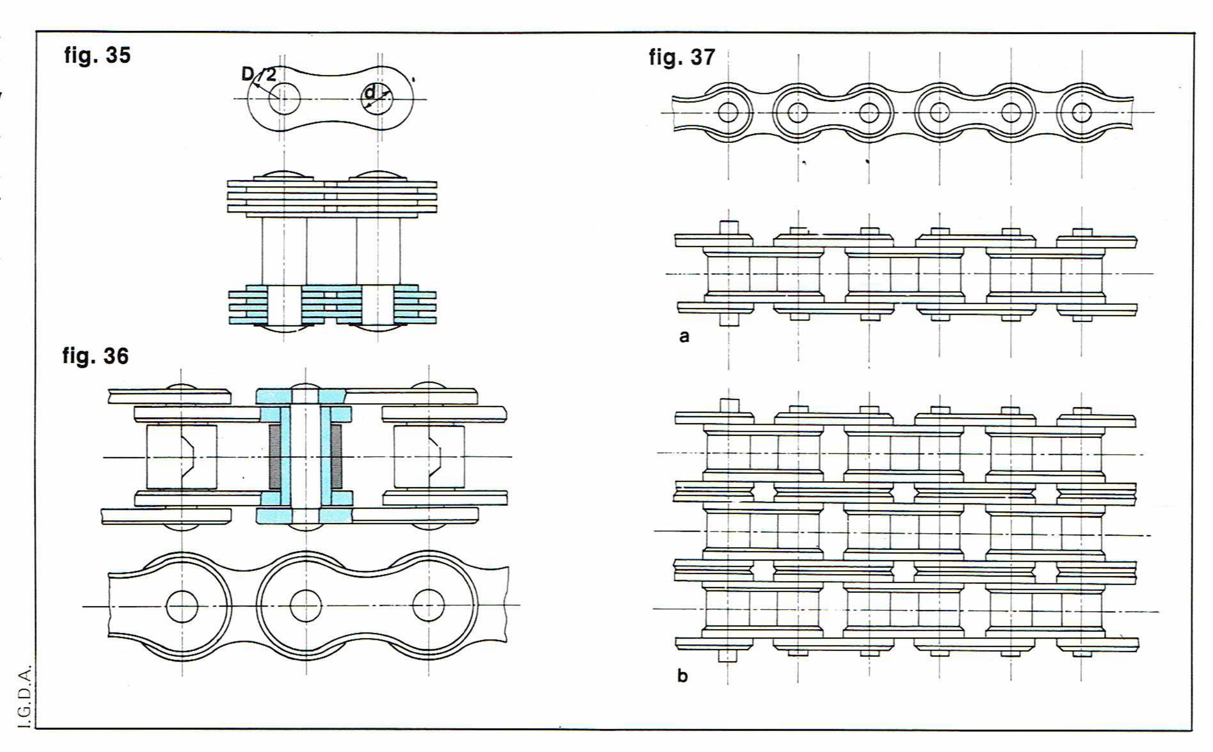

I.G.D.A. - De Gregorio

▲ ***Deux exemplaires de rondelles Belleville.***

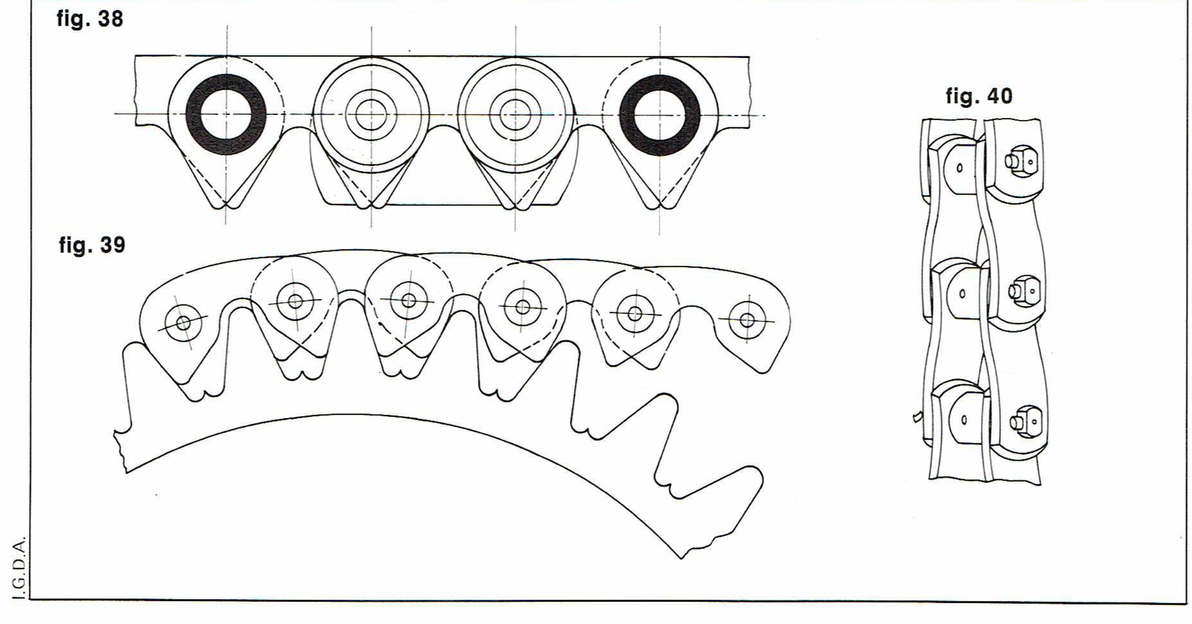
Guy Marineau - TOP

▼ ***Les chaînes comme celles des bicyclettes sont utilisées pour transmettre la puissance d'un arbre à un autre arbre parallèle en évitant l'emploi d'une multitude d'engrenages.***

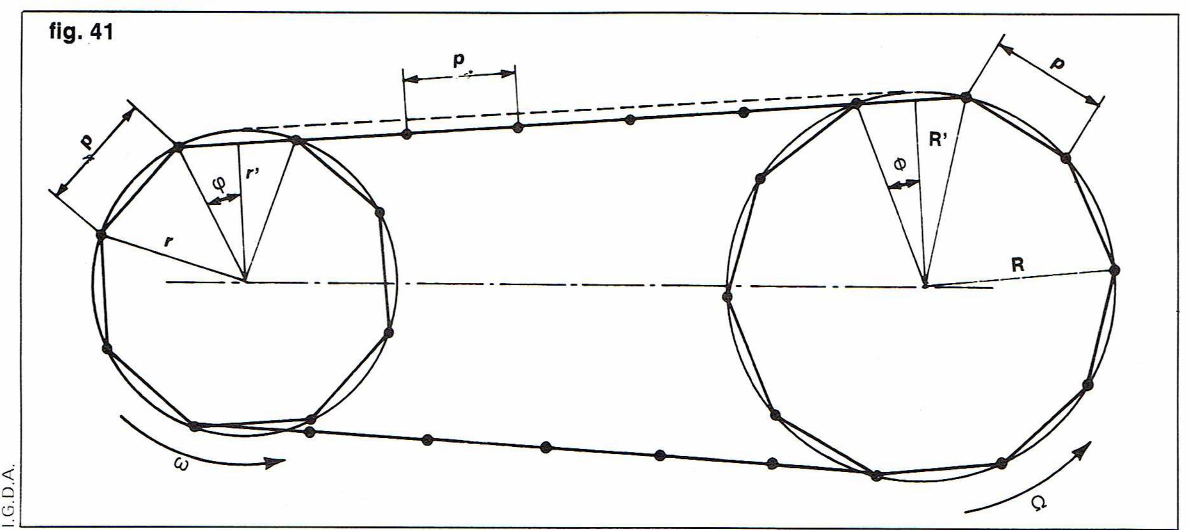
▶ *Figure 35 : détails d'un maillon de chaîne Galle. Figure 36 : détail d'une chaîne à rouleaux. Figure 37 : a) une chaîne simple à rouleaux; b) groupement de chaînes à rouleaux assemblés par le même axe; cette disposition permet la transmission de charges importantes.*



▶ *Page ci-contre, tableau XVII : pression spécifique de contact d'une chaîne en fonction de la vitesse optimale de rotation. Tableau XVIII : valeurs du facteur de service K_0 en fonction de la charge et du nombre de dents du pignon.*



▶ *Figure 38 : détail de chaîne silencieuse. Figure 39 : emboîtement d'une chaîne silencieuse sur sa roue dentée. Figure 40 : chaîne à maillons coudés.*



▶ *Figure 41 ; représentation schématique de l'engrènement chaîne-roues : voir développement dans le texte.*

Étudions l'engrènement chaîne-roues (*fig.* 41), en appelant p le pas de la chaîne. Le pas de la chaîne doit se retrouver sur chacune des roues et, bien sûr, le nombre de dents de chaque roue est entier. Soit φ et Φ les angles au centre de chaque maillon tournant, r et R les rayons primitifs de chaque roue. Il est à remarquer que le pas p des roues correspond à la corde d'un arc et non à la longueur d'arc comme dans les engrenages : $r = \frac{p}{2} \cdot \sin \varphi$ et $R = \frac{p}{2} \cdot \sin \Phi$.

La ligne d'axe de chaque maillon est alors à la distance :

$$r' = \frac{p}{2 \operatorname{tg} \varphi} \quad \text{et} \quad R' = \frac{p}{2 \operatorname{tg} \Phi}$$

Pour éviter le fouettement de la chaîne, les roues doivent être préparées de façon que les rouleaux quittent ou abordent chaque roue suivant la tangente commune aux deux diamètres primitifs, ce qui ne peut être obtenu que si la roue a plus de 8 dents.

A grande vitesse, les vibrations inévitables provoquent, malgré ces précautions, un battement du brin mou. Ce battement peut être réduit par l'addition d'un tendeur de chaîne (soit un galet, soit un poussoir à ressort ou hydraulique).

Conditions de calcul

Contrairement aux engrenages qui doivent être intégralement calculés, les chaînes ne demandent qu'un minimum de calcul, les calculs de résistance des différents éléments constitutifs ayant été effectués par les fabricants.

On adopte les relations pratiques suivantes :

— *vitesse de puissance maximale :*

$$V_m = \sqrt{\frac{F}{30\ ml}}$$

F étant la charge maximale supportée par la chaîne, ml la masse par mètre linéaire de la chaîne ;

— *vitesse optimale :* pour une charge T égale au dixième de la charge de rupture, cette vitesse permet des durées de l'ordre de 15 000 heures :

$$V_0 = \sqrt{\frac{q_0 s}{3\ ml}}$$

s étant la surface d'appui de chaque axe sur la roue. C'est une donnée de fabrication tout comme la *masse linéique*. On peut dire que : $V_0 = 1{,}6\sqrt{q_0}$, q_0 étant la pression spécifique de contact (*tableau* XVII).

Pour déterminer l'effort de tension de la chaîne, il suffit d'écrire la relation : $T \cdot V = P$

T étant exprimé en newtons ; V en m/s et P en watts.

Une tension trop élevée produit un allongement permanent de la chaîne qui engrène mal, le pas étant plus grand que celui de la roue.

La puissance transmise doit subir une correction de coefficient K_0, facteur de service (*tableau* XVIII).

La chaîne est ensuite sélectionnée grâce à la courbe de la *figure* 42.

Les appareils entraînés sont couramment classés de la manière suivante :

— *machines sans chocs :* machines-outils, transporteurs et élévateurs, ventilateurs, imprimantes, machines d'embouteillage, machines à bois, escaliers roulants, compresseurs et pompes centrifuges ;

— *machines irrégulières :* cribles, compresseurs et pompes à pistons, hélices, mélangeurs, treuils ;

— *machines à chocs :* alternateurs et génératrices de sondage, concasseurs, excavateurs, pelles mécaniques, dragues, machines à forger, machines-outils de rabotage, laminoirs, presses.

Entretien et lubrification

Les chaînes demandent une lubrification permanente ; pour cela, elles sont généralement sous carter étanche afin d'éviter les projections d'huile et l'entrée de poussières. Les fabricants recommandent les huiles pour moteur automobile. Lorsque la chaîne est à l'air libre, une protection de sécurité est nécessaire. La lubrification périodique se fait à l'huile de vaseline qui évite l'amalgame de poussière.

Tableau XVII

Pression spécifique de contact d'une chaîne en fonction de la vitesse optimale de rotation en tours par minute

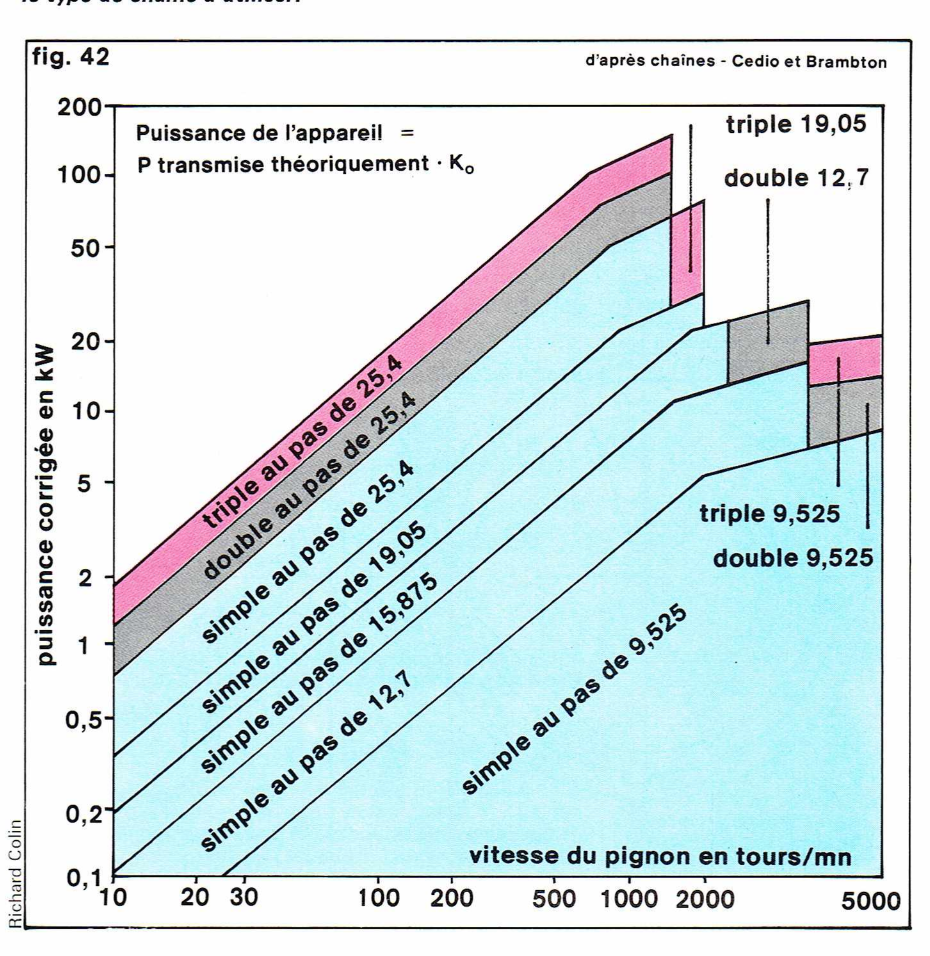
Nombre de tours par minute	0	50	100	500	1 000	5 000
$q°$	400	285	130	155	130	40

Tableau XVIII

Valeurs du facteur de service k_0 en fonction de la charge et du nombre de dents du pignon

Caractéristique de l'appareil entraîné	Nombre Z de dents du pignon				
	17	19	21	23	25
Charge normale	0,80	0,73	0,66	0,63	0,55
Charge irrégulière	1,25	1,1	1	0,95	0,90
Charge avec à-coups importants	1,6	1,5	1,3	1,25	1,20

▼ *Figure 42 ; courbes de la puissance corrigée transmise par une chaîne en fonction de la vitesse du pignon : ces courbes permettent de sélectionner le type de chaîne à utiliser.*



René Dazy

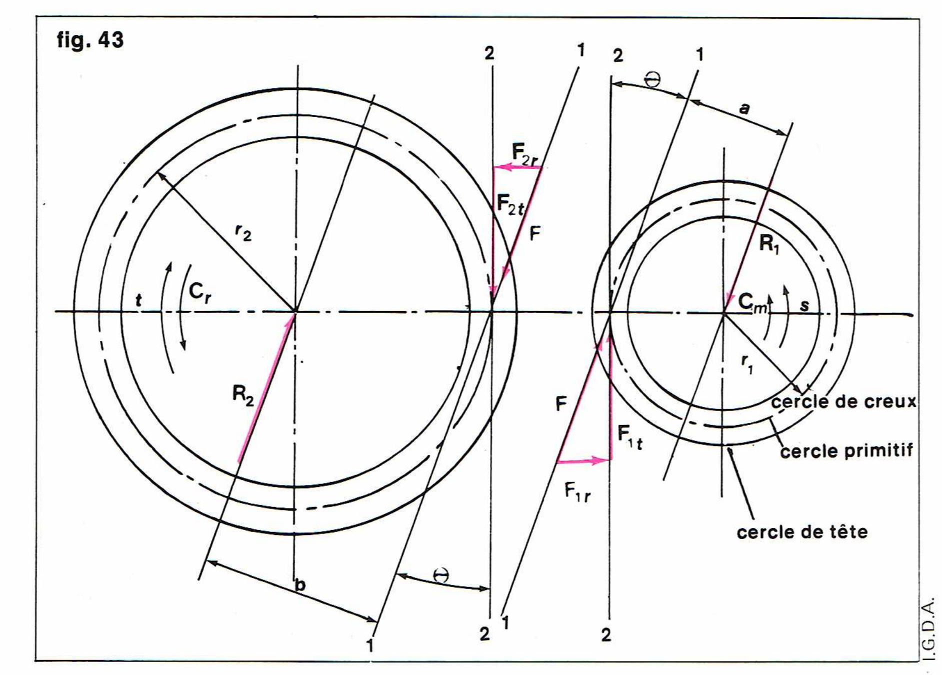
▲ *Charlot et les engrenages (extrait du film les* **Temps modernes***).*

▼ *Figure 43 : couple d'engrenages formé d'une roue dentée de grand diamètre permettant la réduction de la vitesse sans altération importante de la puissance (voir développement dans le texte).*

Engrenages

Un des moyens pour transmettre de la puissance est l'utilisation des roues dentées ou engrenages. Ce moyen permet éventuellement de modifier la vitesse de rotation et le couple transmis mais la puissance est conservée, au rendement près bien entendu.

Le rendement η des systèmes de transmission de puissance par engrenages est généralement bon. Si P_m est la puissance du moteur et P_u la puissance utile à la sortie de l'appareil à engrenages, boîte de vitesses, réducteur de vitesse ou multiplicateur de vitesse, on peut écrire :



$$P_u = \eta P_m$$

η a pour valeur courante 0,95 à 0,98.

Il est admis en moyenne 1 % de perte de puissance par paire de roues utiles.

Relation entre puissance transmise, couple et vitesse de rotation

La puissance a pour unité légale le *watt*, de symbole W. La vitesse a pour unité le *tour par seconde, n,* ou le *radian par seconde* pour la vitesse angulaire, ω ; pour 1 tour un point de la pièce tournante a balayé un angle de 360° ou 2π radians (rd) soit environ 2 · 2,141 6 radians. On a donc 1 tour/seconde = 2π radians/seconde.

La vitesse en tours/seconde est difficilement mesurable.

L'unité de temps étant brève, bien souvent la vitesse de rotation N s'exprime en tours/minute ; on écrit :

$\frac{N}{60} = n$, ou aussi : $\frac{N}{60} \times 2\pi = \omega$ ω radians/seconde

ou $\frac{\pi N}{30} = \omega$, ce qui donne en valeur approchée pour le calcul mental $\omega = \frac{N}{10}$ environ.

Par exemple, un moteur tournant à 1 500 tours/minute a une vitesse angulaire de 150 radians/seconde, la valeur exacte étant 157 radians/seconde.

Pour les rotations, on a la relation :

$$P = C \cdot \omega$$

où C est le couple qui s'exprime en newtons × mètre (N · m).

Engrenages cylindriques

Charge transmise : considérons un couple d'engrenages constitué par une roue de grand diamètre et un pignon de petit diamètre. Supposons que la denture est droite, c'est-à-dire que les dents sont parallèles à l'axe de rotation de chaque engrenage, et que le pignon est l'organe moteur. On appelle *cercle primitif* le cercle de contact des dents des différentes roues (ce cercle est fictif, il n'est pas visible) ; il a pour rayons r_1 et r_2 sur chaque roue (*fig.* 43).

Le *cercle de tête* est le cercle extérieur aux dents (c'est le cercle qui correspond au contour de la pièce avant de tailler les dents). Le *cercle de creux* est le cercle intérieur aux dents (il représente le morceau de pièce restant si on retire les dents).

L'effort est incliné par rapport à la tangente 2-2 au cercle primitif; il a pour direction (1-1) faisant un angle θ avec la tangente (2-2) : cet angle est l'angle de pression; il est en général de 20°.

Il faut mettre en équilibre chaque engrenage, le pignon donnant un effort F à la roue et recevant un effort résistant de même intensité mais de sens opposé.

Les appuis du pignon le maintiennent en place en lui donnant un effort R_1 tel que R_1 et F aient la même intensité mais des directions opposées. Il en est de même pour R_2 et F.

Ces efforts R_1 et F ou R_2 et F créent des couples respectivement moteur et résistant.

Si *a* est la distance entre F et R_1 et *b* la distance entre F et R_2, le couple peut s'écrire :

$$F \cdot a = F \cdot r_1 \cos\theta \quad \text{et} \quad C_r = F \cdot b = F \cdot r_2 \cos\theta$$

$C_m = F \cdot r_1 \cos\theta = F_{1t} \cdot r_1$; F_{1t} étant la projection de F sur la tangente au cercle primitif

et $C_r = F \cdot r_2 \cos\theta = F_{2t} \cdot r_2$.

La projection radiale F_{1r} et F_{2r} n'a aucune influence sur le couple. Comme F est de même valeur sur chaque roue et qu'il y a un seul angle θ : $F_{1t} = F_{2t}$, donc le couple varie avec le rayon et de la même façon :

$$\text{ici } r_2 > r_1 \text{ donc } C_r > C_m$$

ce qui est concevable puisque les vitesses de rotation seront différentes; le pignon tourne à vitesse plus élevée que celle de la roue. Connaissant la puissance P en watts, la vitesse de rotation N en tours par minute et le rayon r_1 en mètres, on peut calculer F_t.

$$P = C\omega = \frac{CN}{10} \quad \text{ou} \quad C_m = \frac{10\,P}{N_m}$$

comme $C_m = F_t \cdot r_1$ pour le pignon.

$F_t = \dfrac{10\,P}{N_m r_1}$ ce qui est d'ailleurs égal pour la roue à $F_t = \dfrac{10\,P}{N_r r_2}$

Calcul de la résistance de la dent à flexion

La *figure* 44 représente une dent. Soit *s* l'épaisseur de la dent au cercle primitif. Pour la facilité d'usinage, la dent est symétrique et, pour une simple question de résistance, les dents de chaque roue et pignon engrenant ensemble doivent avoir la même épaisseur, l'effort F étant de même valeur sur roue et pignon. Il faut donc que l'intervalle entre deux dents successives soit égal à l'épaisseur de la dent. Le nombre de dents est évidemment entier, soit Z. Le développement du cercle primitif est πD ou $2\,\pi r$. Ce développement correspond à Z fois la longueur d'arc de dent et d'intervalle, soit

$$2\,\pi r = 2\,Z \cdot s.$$

La valeur 2 *s* est le pas *p* de l'engrenage. On peut écrire :

$$r = Z\frac{s}{\pi} \quad \text{ou} \quad D = Z\frac{p}{\pi}$$

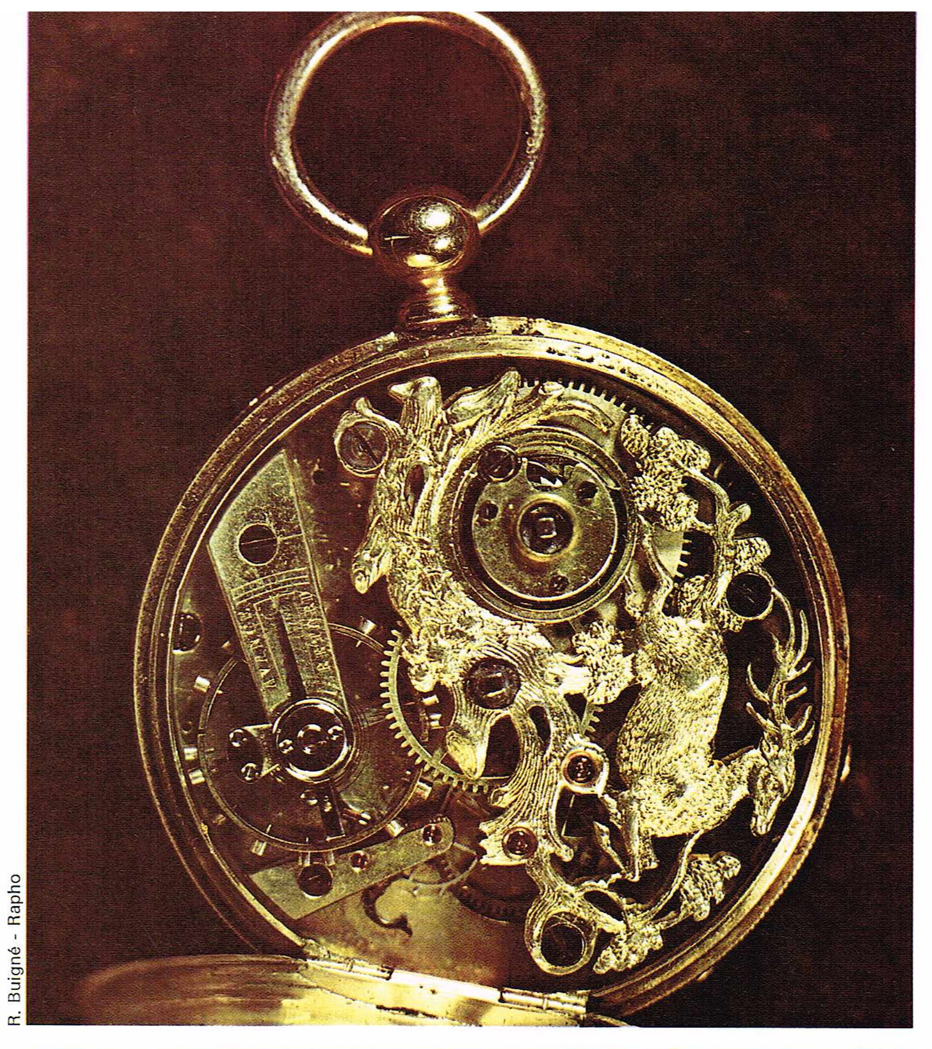
Les roues engrènent ensemble si leur pas est le même, donc si $\frac{p}{\pi}$ est le même pour les différents couples. On appelle *module m* la valeur $\frac{p}{\pi}$.

On peut dire : $m_1 = m_2 = m = \dfrac{p}{\pi} = \dfrac{D_1}{Z_1} = \dfrac{D_2}{Z_2}$.

Il est à noter que le rapport de réduction τ peut s'écrire soit en fonction des diamètres, soit en fonction des nombres de dents

$$\tau = \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{D_1}{D_2}$$

Le module *m* définit les dimensions géométriques de la dent. Pour des nombres de dents identiques Z_1 et Z_2, deux couples d'engrenages ayant des modules différents donneront un même rapport de réduction. Le module peut être *a priori* librement choisi, cependant, pour simplifier l'outillage, des séries de modules ont été normalisées (*tableau* XIX).

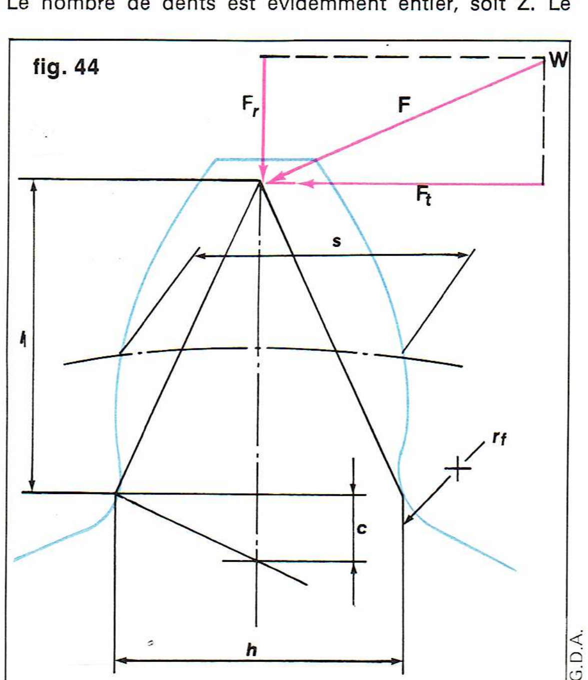


R. Buigné - Rapho

Tableau XIX
Modules normalisés (en mm) pour roues dentées

principaux		secondaires		exceptionnels
0,5	2	0,55	1,75	0,75
0,6	2,5	0,7	2,25	3,25
0,8	3	0,9	2,75	3,75
1	4	1,125	3,5	6,5
1,25	5	1,375	4,5	
1,5	6		5,5	
			7	

▲ *En haut, les rouages d'une montre ancienne. Tableau XIX : les modules normalisés pour les roues dentées.*



I.G.D.A.

◀ ***Figure 44 :** représentation schématique d'une dent d'engrenage cylindrique permettant le calcul de la résistance de la dent à la flexion avec* $c = \dfrac{h^2}{4\,l}$

▶ *Figure 45 : modèle mathématique de dent permettant les calculs de base.*

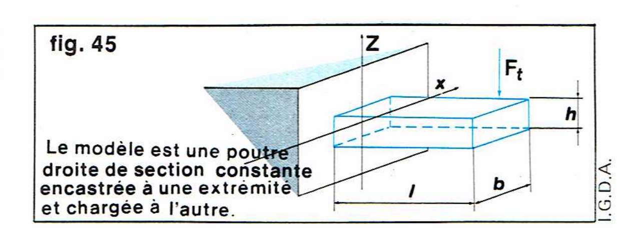


Tableau XX : Valeur du facteur K_l pour les engrenages à dents droites et hélicoïdales

Nombre de cycles de fatigue	Dureté Brinell		
	160 H_B	250 H_B	450 H_B
1 000	1,6	2,4	3,4
10 000	1,4	1,9	2,4
100 000	1,2	1,4	1,7
1 000 000	1,1	1,1	1,2
10 000 000	1,0	1,0	1,0

R_e : résistance élastique du métal
K_l : coefficient de dureté
K_f : coefficient de fatigue compris entre 1 et 3 (1,5 pour un acier doux ; 2,8 pour un acier haute résistance)
K_t : coefficient de température d'utilisation $K_t = \dfrac{460 + T}{620 \text{ en degrés F}}$

▲ *Tableau XX : valeur du facteur de longévité ou de durée K_l pour les engrenages à dents droites et hélicoïdales*
$\sigma_{pratique} = R_e K_l / K_t \cdot K_f$.

Seules des roues de même module peuvent engrener. De même, certaines dimensions des dents sont normalisées :

— la *saillie :* partie de dent au-delà du cercle primitif (saillie = module) ;

— le *creux :* partie de dent en deçà du cercle primitif (creux = 1,25 module), ce qui permet à la saillie de dent de l'autre roue de passer sans buter à fond de dent ;

— la *hauteur totale* de la dent est donc :

saillie + creux = 2,25 modules ;

— l'*épaisseur* de dent est $\dfrac{\pi m}{2} \simeq 1{,}6$ module ;

— la *largeur* est donnée en fonction du module. On donne largeur de dent : λm, ce qui indique des proportions entre épaisseur et largeur de dent (λ varie de 5 à 10). Les grandes valeurs de λ demandent une rectification des dents.

Il est possible de comparer une dent d'engrenage à la poutre encastrée de la *figure* 45.

On suppose l'effort F_t appliqué à l'extrémité de la dent qui a pour épaisseur $h = \dfrac{m\pi}{2}$, pour largeur $b = \lambda m$ et pour porte-à-faux $l = 2{,}25\ m$.

Le moment d'inertie de la section transversale de la poutre, donc de la dent, est

$$\mathfrak{J} = \frac{bh^3}{12} \quad \text{et} \quad \frac{\mathfrak{J}}{v} = \frac{\mathfrak{J}}{h/2} = \frac{bh^2}{6} = \frac{\lambda m\ (1{,}6)^2\ m^2}{6}$$

La contrainte dans la dent est au maximum :

$$\sigma_{max} = \frac{\mathcal{M}_f}{\frac{\mathfrak{J}}{v}}$$

$\mathcal{M}_f$ est le moment fléchissant ; il est égal à

$$F_t \times l = F_t \times 2{,}25\ m.$$

Des formules précédentes on déduit :

$$\sigma_{max} = \frac{F_t \times 2{,}25\ m}{\frac{\lambda m\ (1{,}6)^2\ m^2}{6}} = \frac{5\ F_t}{\lambda m^2}$$

$$\sigma_{max} = \frac{5\ F_t}{\lambda m^2}$$

ce qui peut aussi s'écrire en fonction du couple transmis :

$$C = F_t \cdot r \quad \text{et} \quad r = \frac{mZ}{2}$$

donc $\sigma_{max} = \dfrac{10\ C}{\lambda Z m^3}$

ou encore, en fonction de la puissance et de la vitesse de rotation et du nombre de dents :

$$\sigma_{max} = \frac{100\ P}{\lambda Z N m^3}$$

Dans la méthode de calcul précédemment décrite, nous avons supposé que l'effort agissait en bout de dent et qu'une seule dent par roue transmettait tout l'effort ; en fait, la dent n'est pas seule à transmettre cet effort, plusieurs dents de la même roue sont utiles simultanément, et l'effort n'est pas tout à fait à l'extrémité de la dent. Il y a malgré tout fatigue des dents qui se trouvent chargées et déchargées pendant la rotation, le coefficient de fatigue K_f étant variable de 1 à 3 suivant le matériel et la machine utilisatrice.

Si la température dépasse 70 °C ou 160 °F, la dureté du métal se modifie, le facteur de température K_t est donné par :

$$K_t = \frac{(460 + T)}{620}, \qquad \text{T étant exprimé en °F.}$$

Suivant le traitement thermique effectué sur les dents et la durée d'utilisation souhaitée, la correction effectuée intervient par le facteur de durée K_l ou facteur de longévité, qui est fonction de la dureté Brinell H_B (*tableau* XX).

Les trois facteurs précédents corrigent la résistance R_p à la fatigue du métal pour obtenir une contrainte admissible σ_{adm} inférieure à la résistance pratique :

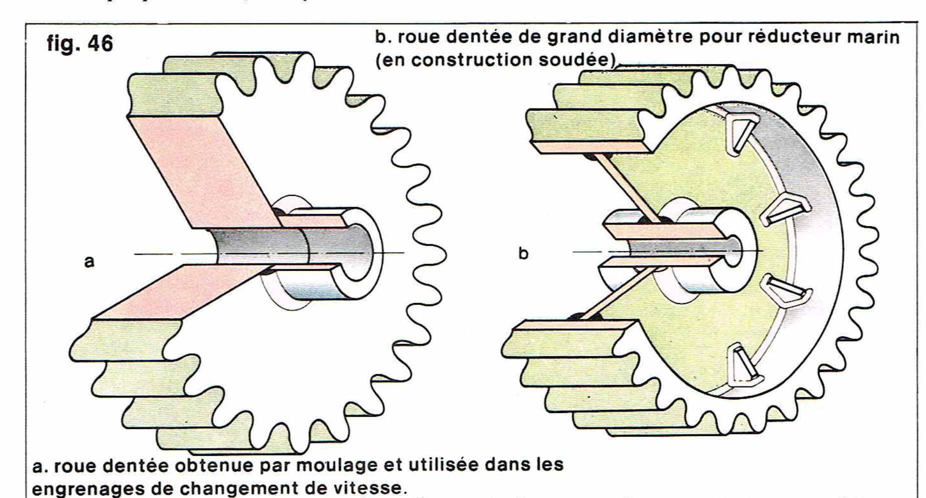
$$\sigma_{adm} = \frac{R_p K_l}{K_t K_f}$$

La contrainte calculée doit rester inférieure à la contrainte admissible pour permettre une bonne tenue des dents :

donc $\sigma_{max} < \sigma_{adm}$

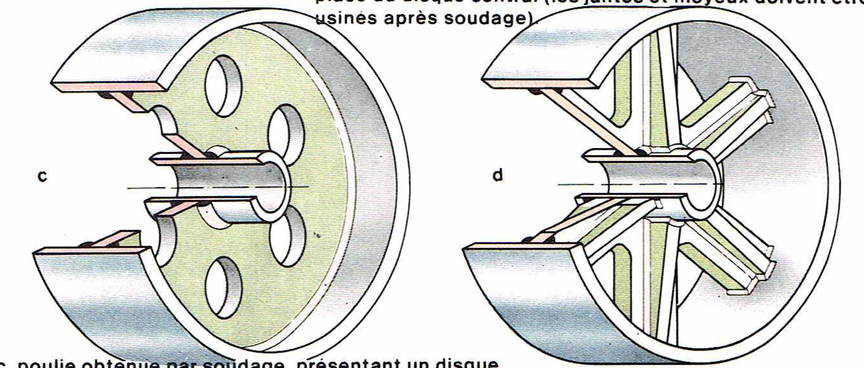
ou $\dfrac{10\ C}{\lambda Z m^3} < \dfrac{R_p K_l}{K_t K_f}$

fig. 46



b. roue dentée de grand diamètre pour réducteur marin (en construction soudée).

a. roue dentée obtenue par moulage et utilisée dans les engrenages de changement de vitesse.



d. poulie construite par soudage, munie de rayons à la place du disque central (les jantes et moyeux doivent être usinés après soudage).

c. poulie obtenue par soudage, présentant un disque ou voile central percé de trous pour l'allègement.


I.G.D.A. - De Gregorio


I.G.D.A. - Rizzi

◀ *A gauche, une denture à chevrons; à droite, une denture hélicoïdale.*

Réalisation et construction des engrenages

Les grandes roues dentées ont l'apparence d'une poulie à la périphérie de laquelle ont été usinées des dents dans l'épaisseur de la jante. Les roues de taille importante peuvent être construites par soudure ou moulage; les roues de petite et moyenne dimension sont usinées dans la masse; ou, parfois, le pignon est taillé directement dans l'arbre pour obtenir un *pignon arbré,* qui peut aussi être forgé dans certains cas (*fig.* 46). Quelle que soit la méthode utilisée, les dents sont taillées à l'aide de machines spéciales. On rencontre de plus en plus d'engrenages obtenus directement par frittage (compression à haute température de poudre métallique dans un moule de forme).

Denture hélicoïdale

Il est en fait assez rare d'utiliser des engrenages à denture droite comme précédemment. La dent droite a l'inconvénient de présenter une attaque brutale. Pendant la rotation, il y a choc des dents des deux roues, ce qui nuit à la durée de fonctionnement et, de plus, est source de bruit.

La denture hélicoïdale permet une attaque progressive; les engrenages sont alors plus silencieux et moins fragiles.

Il y a néanmoins un revers; l'inclinaison de denture introduit un effort axial $F \cdot \sin \alpha$ et les roulements d'arbre doivent être calculés en conséquence.

Dans de gros réducteurs, cet effort axial peut prendre des valeurs considérables. Il suffit de placer deux roues jumelées d'inclinaison opposée pour obtenir une denture dite *denture chevron*.

Roues coniques

L'industrie sait calculer et réaliser des engrenages pour des axes de position quelconque. L'emploi en est particulièrement rare.

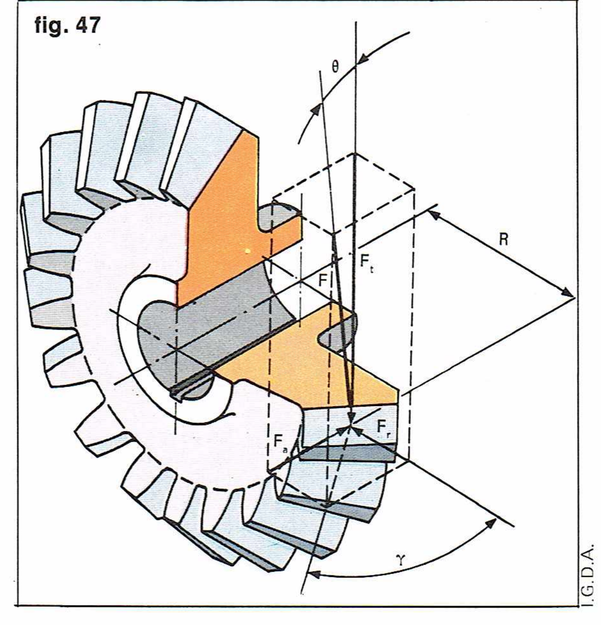
La majorité des cas utilisés concerne les engrenages d'axes parallèles à denture droite ou hélicoïdale et assez souvent des engrenages d'axes perpendiculaires à denture droite ou hélicoïdale.

Les engrenages coniques sont particulièrement délicats à réaliser, le profil des dents n'étant pas constant, ce qui nécessite un usinage face par face pour chaque dent; cela rend l'emploi particulièrement coûteux.

Les paliers de chaque arbre, même pour des dents droites, doivent supporter un effort axial. Les calculs font intervenir l'effort au rayon moyen des roues (*fig.* 47). L'effort F normal à la dent est projeté en F_t, F_a, F_r sur les différents axes *x, y, z*. L'angle θ de pression est normalement de 20°, d'où $F_t = F \cos \theta$.

L'angle γ dépend du diamètre des engrenages et de l'angle de calage des arbres (*fig.* 48).

Il résulte que $F_r = F \sin \theta \cdot \cos \gamma$ et $F_a = F \sin \theta \cdot \sin \gamma$, ce qui permet de déterminer l'effort axial et l'effort radial supportés par l'arbre porte-engrenage.

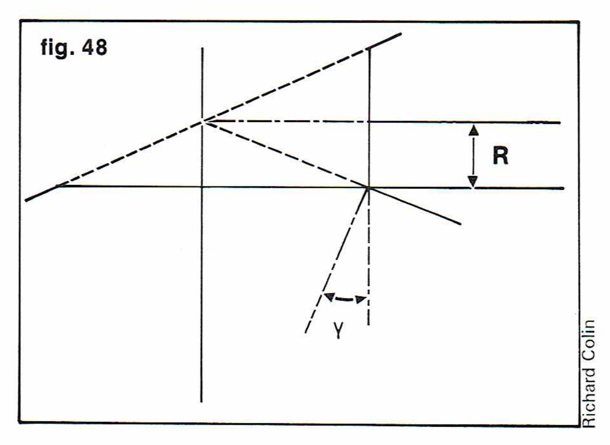


I.G.D.A.

◀ *Figure 47 : schéma montrant l'importance et la direction des 3 composantes F_t, F_a, F_r de la force F normale à la dent d'une roue conique.*

L'effort F_t est supposé concentré au rayon moyen R; il est calculé connaissant le couple transmis C : $F_t = C/R$.

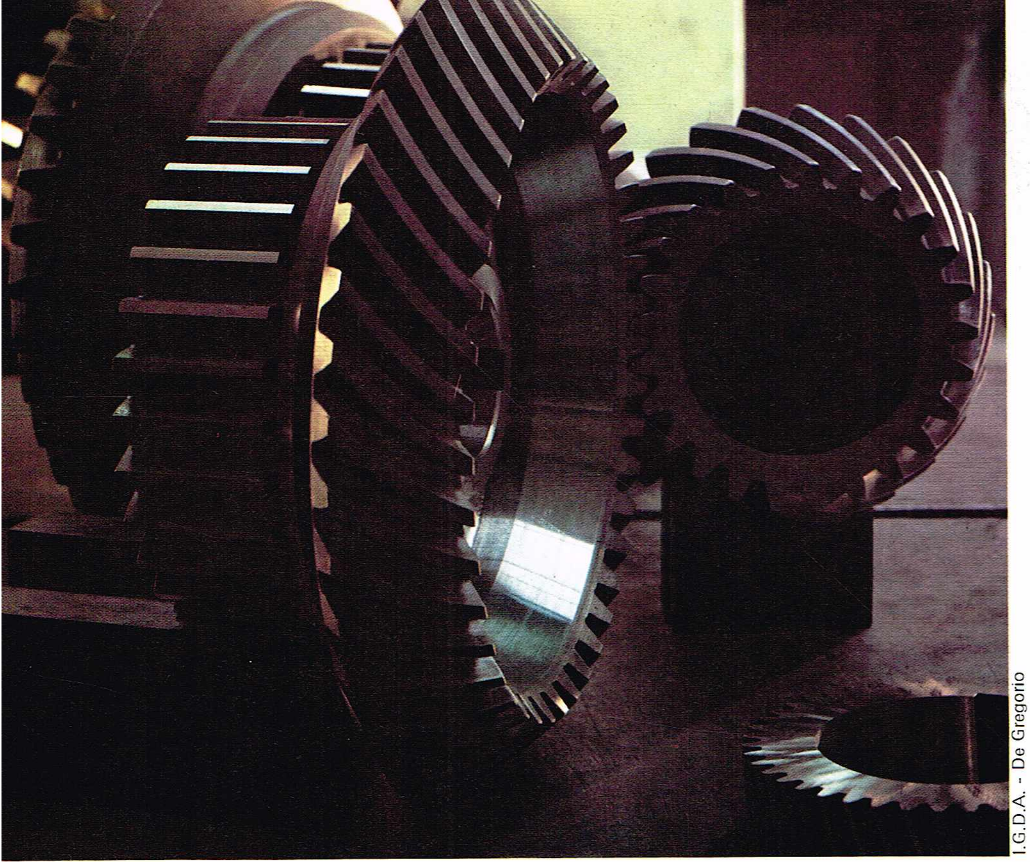
Les calculs se développent de la même manière que pour les engrenages d'axes parallèles; le rayon moyen est $R = \frac{R_i + R_e}{2}$, R_i et R_e étant respectivement le rayon intérieur et le rayon extérieur de la roue; le module moyen



Richard Colin

◀ *Page ci-contre, en bas, figure 46 : représentations schématiques de poulies et roues dentées obtenues par différentes techniques*

◀ *Figure 48 : détermination de l'angle γ pour le calcul d'une roue conique.*



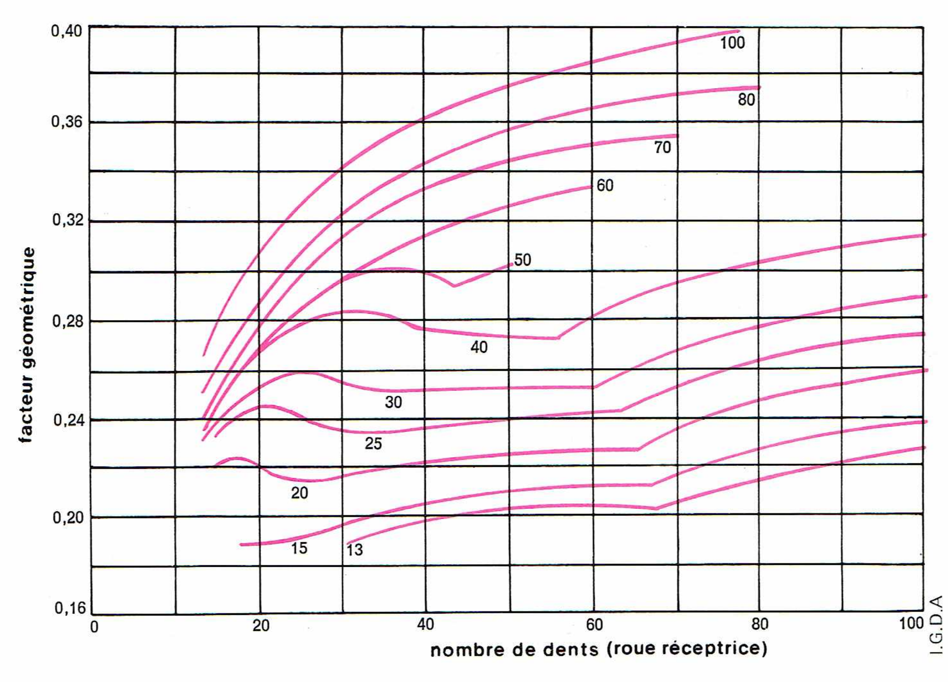
I.G.D.A. - De Gregorio

▲ *Roues dentées : la partie cylindrique est à dents droites ; la partie conique présente une denture Gleason.*

▼ *Tableau XXI : valeurs du facteur de distribution de charge K_c pour roues coniques.*
Figure 49 : diagramme donnant la valeur du facteur géométrique K_g en fonction du nombre de dents de la roue et du pignon conique.

Tableau XXI
Valeurs du facteur de distribution de charge K_c

Utilisation	roue entre coussinets	une roue encastrée	deux roues encastrées
Applications industrielles	1,00-1,10	1,10-1,25	1,25-1,40
Construction automobile	1,00-1,10	1,10-1,25	—
Construction aéronautique	1,00-1,25	1,10-1,40	1,25-1,50



est $m = \frac{D}{Z} = \frac{2R}{Z}$, et, si on adopte pour la roue et pour le pignon un nombre de dents fictif (respectivement Z_r et Z_p), on a :

$$Z_{fr} = \frac{Z_r}{\cos \gamma_r} \qquad Z_{fp} = \frac{Z_p}{\cos \gamma_p}$$

Après calcul de prédétermination, il faut corriger de la façon habituelle en tenant compte de la fatigue, des chocs, de la répartition de la charge et de la vitesse. On peut pour cela appliquer la *méthode de Lewis*. Un dimensionnement plus précis peut être obtenu en tenant compte de résultats pratiques et de l'expérience acquise ; pour cela, on peut utiliser la formule à adapter pour chaque roue et pour chaque cas de charge :

$$\sigma = F_t \frac{Z}{D_p \lambda m} \frac{K_s K_c}{K_v K_g}$$

K_c est le facteur de distribution de charge (*tableau* XXI).

Le facteur géométrique K_g se déduit du diagramme de la *figure* 49 en fonction du nombre de dents de la roue et du pignon. Le nombre de dents d'une des roues est lu en abscisse, le nombre de dents de l'autre roue est lu sur les courbes.

Les autres facteurs K_s et K_u sont les facteurs de service et de vitesse. Le facteur K_s tient compte des irrégularités de fonctionnement et des chocs propres à la machine. Un ventilateur et un concasseur, par exemple, n'ont pas le même facteur de service ; un appareil entraîné par un moteur électrique ou par un moteur Diesel monocylindre n'a pas non plus la même régularité de fonctionnement. Il faudra donc estimer par comparaison la valeur de K_s, sachant qu'elle est comprise entre 1 et 2,25.

Le facteur de vitesse K_v tient compte de la vitesse d'entrée en contact de deux dents sans tenir compte du service de l'appareil, ce qui est le rôle d'autres facteurs. Ce facteur de vitesse ne tient pas compte des efforts extérieurs à l'appareil ; il ne faut se préoccuper que du fonctionnement interne au niveau de la roue menée et de la roue menante.

Observons l'exemple de la *figure* 50a, où est portée en abscisse la ligne de conduite de dents : c'est la ligne de contact des dents [en (1) contact initial et en (2) fin du contact] ; en ordonnée est porté l'effort développé dans une dent.

A l'instant du contact initial au voisinage de (1), la roue conduite doit accélérer ; comme elle possède une certaine masse et une certaine inertie de rotation, il se développe un effort F_1. Cette brutale accélération tend à éjecter la dent menée, ce qui conduit à une annulation de l'accélération, les vitesses des deux roues devenant identiques. Ensuite, apparaît l'effort F_2 caractérisé par l'application de l'effort maximal ayant pour origine le couple transmis, pour descendre ensuite à une valeur moyenne F_3 pour finir par un effort F_4. Au moment où une autre dent entre en contact en bout de ligne de conduite, l'effort s'annule au point (2), la dent est libérée du contact. On multiplie l'effort F_3 par le coefficient de vitesse K_v. Le coefficient K_v a pour expression :

$$K_v = \frac{78}{78 + v}$$

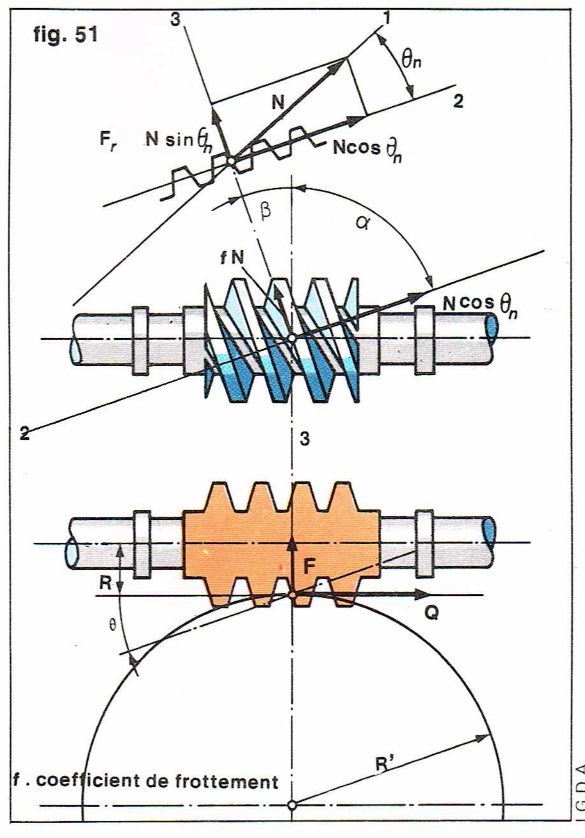
v étant la vitesse tangentielle au diamètre primitif, qui se détermine aisément.

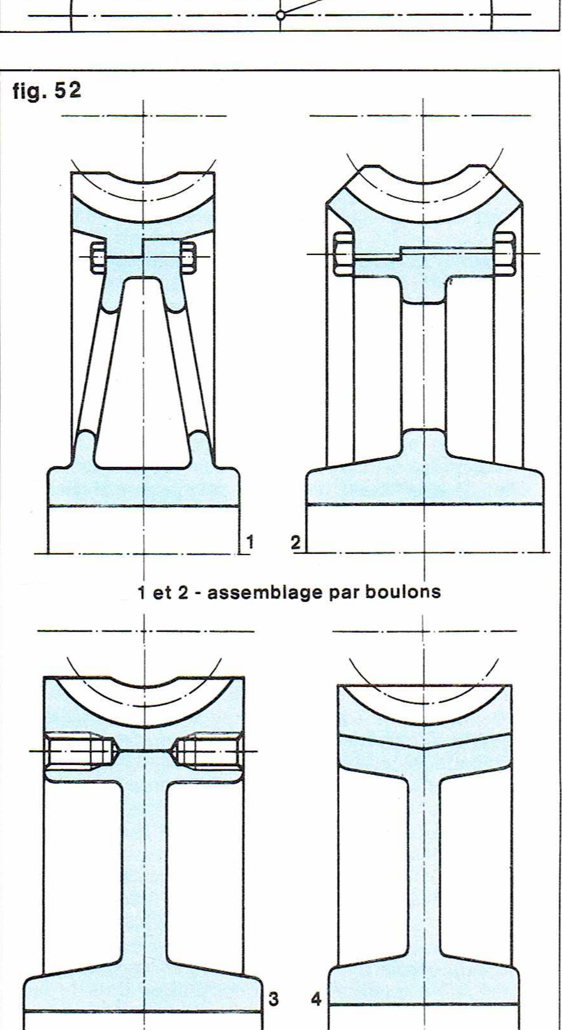
Roue et vis sans fin ou vis tangente

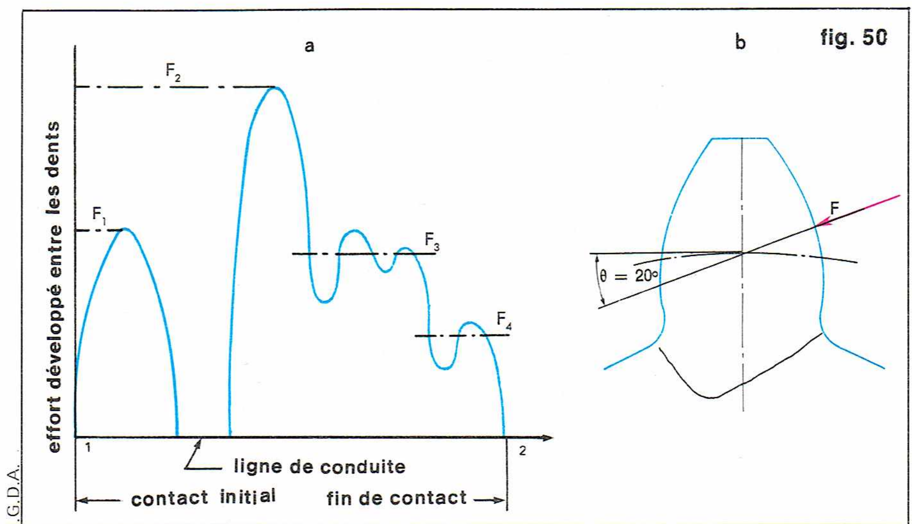
Les engrenages pour arbres parallèles ou perpendiculaires concourants précédents permettent des rapports de réduction de 6 à 7 par couple ; pour des réductions plus importantes, le système à roue et vis tangente permet la réalisation d'appareils moins encombrants. La disposition courante compte deux arbres perpendiculaires mais non concourants ; les axes sont orthogonaux.

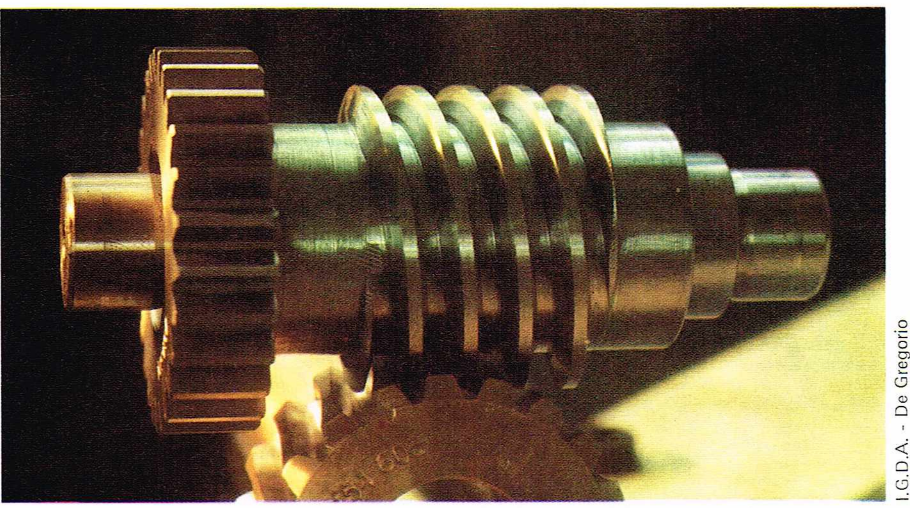
La vis est en quelque sorte une vis de boulonnerie ou plutôt une vis d'étau à filet trapézoïdal très accentué, en prise sur un engrenage.

La *figure* 51 illustre schématiquement la disposition de la roue et de la vis, ainsi que les directions des principaux efforts. L'angle de pression est toujours θ. Dans cette disposition, suivant la valeur du pas et du diamètre de la vis, le filet est plus ou moins incliné ; soit β l'inclinaison du filet ; R et R' sont les rayons primitifs respectifs de la vis et de la roue.









L'effort normal à la surface du filet est N. Il est contenu dans un plan perpendiculaire à celui du schéma et passant par 2-2. En projection sur 2-2 et 3-3, il vient N · cos θ_n et N · sin $\theta_n = F_r$. La composante axiale de la vis est la composante tangentielle de la roue; il faut projeter N cos θ_n et fN sur l'axe de la vis, f étant le coefficient de frottement, d'où

$$Q = N\ (\cos\theta_n \cdot \cos\beta - f \cdot \sin\beta)$$

C'est cet effort Q qui produit la rotation de la roue. Les autres efforts se trouvent facilement par projection, pour déterminer l'effort axial de la roue et l'effort radial de la vis.

Dans cette construction, des efforts autres que ceux intéressant directement la transmission de puissance sont créés; le rendement de ce réducteur est relativement faible, de l'ordre de 0,7. Il est cependant très simple de déterminer le rapport de réduction par le rapport $\frac{n_f}{Z_R}$, n_f étant le nombre de filets de la vis et Z_R le nombre de dents de la roue. Le nombre de filets se voit en bout de vis pour ne pas être confondu avec le nombre d'hélices apparentes sur le cylindre de la vis.

Caractéristiques de construction

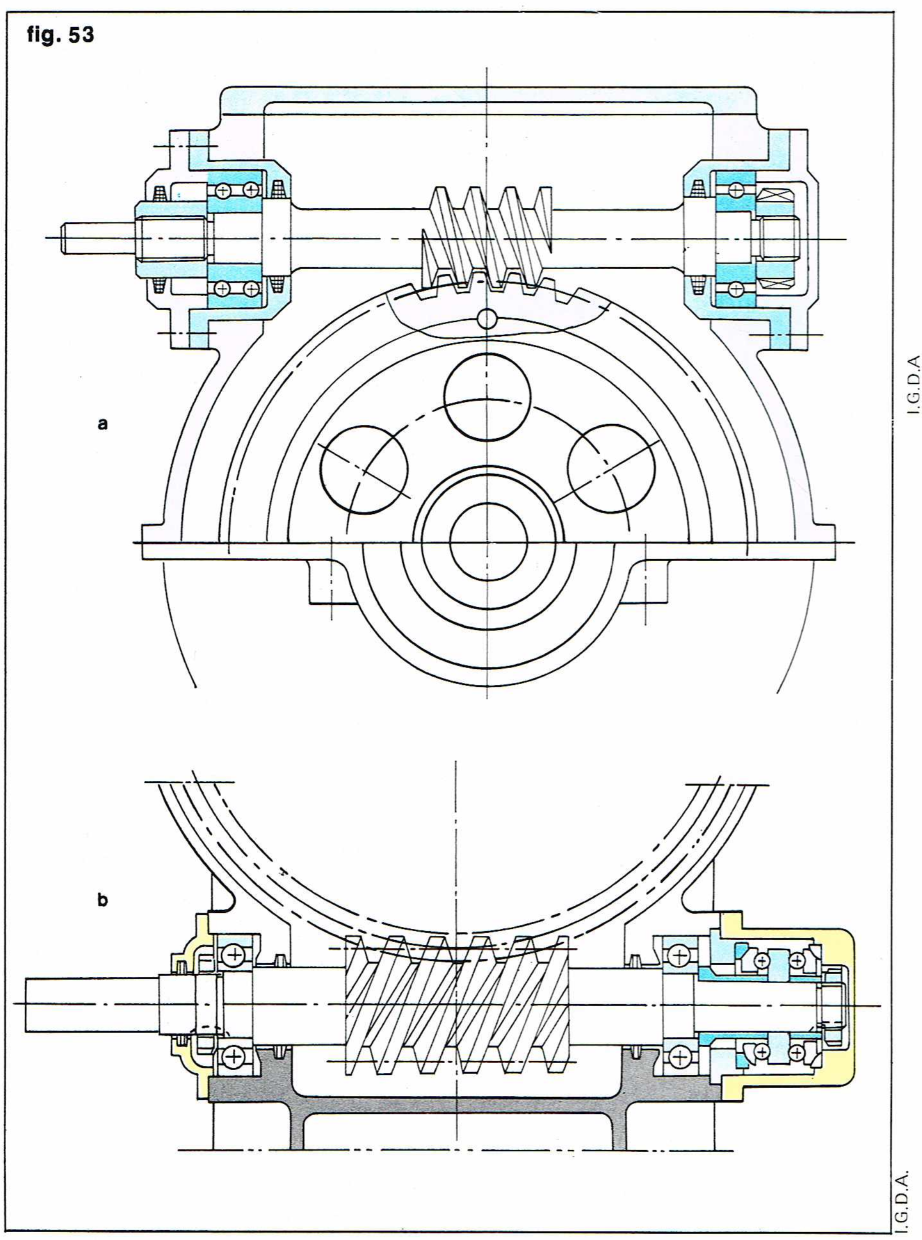
Différentes formes de roues sont utilisées : la plupart du temps, les dents de roues sont arrondies pour mieux épouser la vis. La jante de roue a une forme torique.

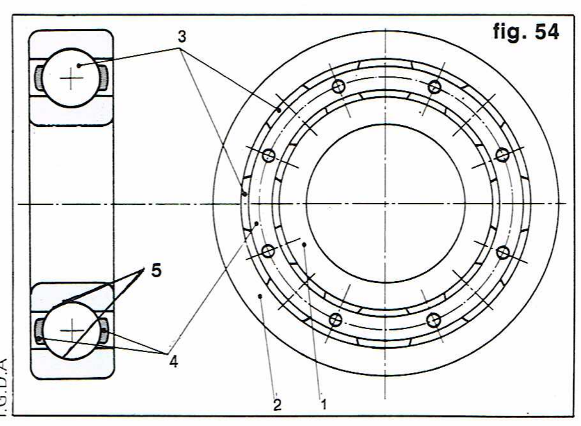
Il est très courant d'utiliser des roues à couronne dentée en bronze phosphoreux, ce qui réduit le frottement et améliore sensiblement le rendement. Dans ce cas, la jante est rapportée sur un moyeu en acier ou en fonte lorsque le diamètre est important (*fig.* 52).

Toujours en vue de réduire le frottement, roue et vis sont montées sur roulement et butée. Généralement, pour éviter un brassage trop important d'huile, la vis à rotation rapide est placée en partie haute de l'appareil (*fig.* 53).

▲ ***Figure 51 :** disposition de la roue et de la vis dans le groupement roue-vis sans fin, et direction des principaux efforts.*
***Figure 50 :** a) effort développé entre deux dents de roue en fonction de la ligne de conduite des dents; b) schéma montrant les lignes de rupture les plus fréquentes dans une dent de roue cylindrique.*
Ci-dessus, assemblage d'une vis sans fin et d'une roue.

◀ ***Figure 52 :** différents types d'assemblage de jante sur roue.*





▲ *Figure 53 : deux exemples de montage de roue et de vis sans fin de réducteurs. Figure 54 : représentation schématique d'un roulement à billes à gorges profondes.*

Roulements

Lors du mouvement relatif de deux solides, il y a déplacement d'une pièce par rapport à l'autre. Ce déplacement correspond à un besoin de fonctionnement; la pièce mobile doit suivre une trajectoire bien déterminée. Cette trajectoire est définie par des guidages qui peuvent être des paliers ou des glissières dans les rotations ou déplacements rectilignes.

Le mouvement relatif de trajectoire définie directement par deux surfaces dans les liaisons lisses peut aussi être réalisé par l'interposition d'éléments roulants (billes, galets, aiguilles) entre deux surfaces portées respectivement par chaque solide; ces surfaces sont des pistes.

Alors que les surfaces lisses de guidage sont généralement réservées sur chaque solide, les pistes de roulement sont presque toujours portées par des pièces standardisées (les bagues, ou glissières) que l'on fixe sur les solides à guider.

Les ensembles mécaniques constitués par ces deux pièces portant les pistes et les éléments roulants prennent le nom de *roulements* et *butées* lorsqu'il y a mouvement de rotation, de *glissières à roulement* lorsqu'il y a mouvement de translation, de *vis à bielles* lorsqu'il y a mouvement hélicoïdal. Dans tous les cas, le frottement est remplacé par du roulement.

Avant d'aborder plus en détail l'étude des roulements, des remarques préliminaires s'imposent. Le montage des roulements facilite dans bien des cas le guidage en rotation, à condition de respecter un minimum de règles élémentaires :

Il ne faut pas oublier que le métal constituant le roulement change de caractéristiques mécaniques à partir de 100 °C.

Le roulement n'est pas un ensemble mécanique parfait. Les pistes ne sont pas des cercles géométriquement parfaits; de même, les billes ou rouleaux ne sont pas parfaits; ceci entraîne des défauts systématiques de rotation et, de plus, le roulement est une source non négligeable de vibrations. Contrairement au guidage lisse correctement lubrifié, le roulement ne permet pas d'amortir les chocs; le film d'huile du palier lisse joue le rôle de matelas amortisseur, alors que les billes d'acier sont infiniment plus rigides.

Description

Les roulements sont couramment réalisés en acier 100 C6 trempé, c'est-à-dire un acier à 1 % de carbone et 1,5 % de chrome, parfois en acier inoxydable.

Seule la très grande série permet d'obtenir des ensembles de bonne précision, les éléments étant choisis (éléments apairés) parmi des éléments fabriqués, ce qui permet d'obtenir des jeux constants dans chaque dimension de roulement.

On distingue dans le roulement différentes pièces qui sont (*fig.* 54) la bague intérieure (1), la bague extérieure (2) [sur chacune des bagues ont été usinées des pistes (5)], les corps roulants (3) et une cage (4) réalisée en une ou plusieurs pièces métalliques ou en plastique moulé. Cette cage permet de maintenir l'écartement entre les corps roulants. Il est à noter que dans le roulement à billes les pistes sont des portions de tore.

Du jeu est nécessaire entre pistes et corps roulants. Ce jeu permet la libre dilatation des différentes pièces; en effet, le coefficient de roulement n'est pas nul; bien que faible, il existe si bien que sous les efforts supportés par le roulement une faible perte de rendement dissipe en chaleur une partie de la puissance de l'appareil.

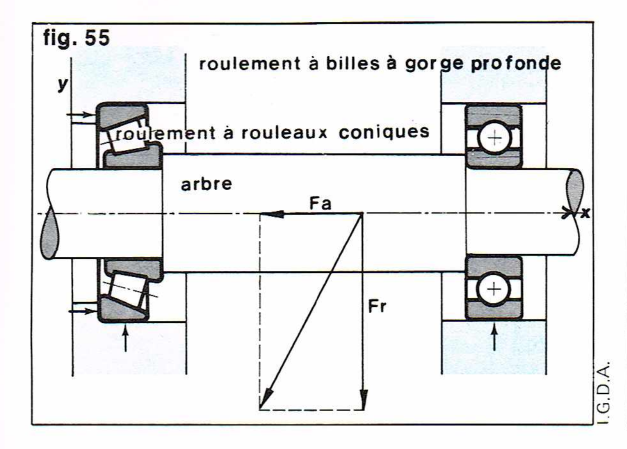
En général, la bague extérieure est en contact avec des parties massives de la machine, le carter par exemple; cette bague peut donc évacuer dans de bonnes conditions la chaleur reçue pour conserver une température relativement faible.

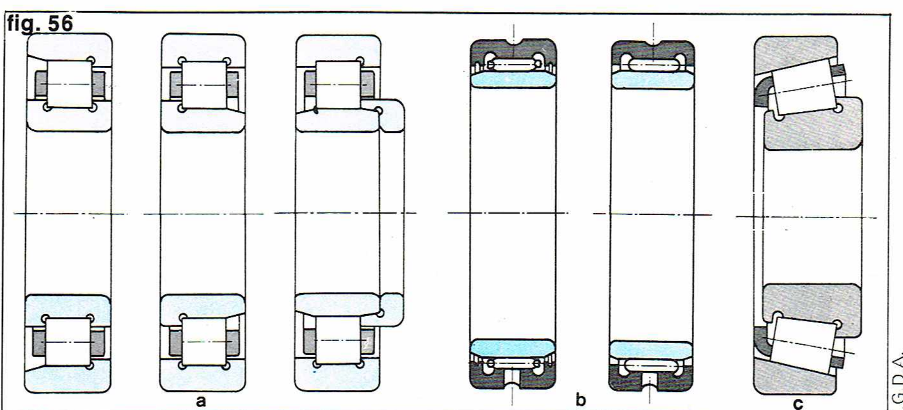
La quantité de chaleur transmise à la bague intérieure se transmet à l'arbre; cet arbre se trouve isolé, par les roulements, du contact avec le carter de la machine et ne peut évacuer les calories que par l'air qui le sépare du carter; donc évacuation faible, d'où échauffement plus important de la bague intérieure qui, en se dilatant, augmente de diamètre, ce qui a pour effet de réduire le jeu initial du roulement.

Si le jeu devient nul ou négatif (serrage), il se crée des efforts internes s'ajoutant aux efforts machines, et le phénomène de dilatation s'accentue jusqu'au blocage du roulement.

Cela explique la nécessité de lubrifier les roulements : une très faible quantité d'huile est utilisée pour la lubrification proprement dite, tandis que la majeure partie est utilisée pour l'évacuation des calories.

Dans le cas d'un carter fermé avec bain d'huile, l'huile chaude se refroidit au contact du carter qui transmet la chaleur à l'air ambiant. La température courante des diffé-





rents appareils est de l'ordre de 50 à 80 °C, les calories reçues par l'huile ayant pour origine les paliers et les engrenages, chaînes et autres organes constitutifs des appareils.

Différents types de roulements pour différentes charges

Considérons un plan passant par l'axe de rotation d'un arbre ; supposons-le vertical (*fig.* 55).

La charge supportée par l'arbre est généralement oblique dans le plan. On utilise dans les calculs les projections sur l'axe Ox de l'arbre : effort axial F_a et sur une normale Oy à l'arbre effort radial F_r.

Une butée supporte uniquement des charges axiales pures ; un roulement à aiguilles et certains roulements à rouleaux subissent uniquement des charges radiales pures. Les autres roulements peuvent supporter des charges de direction quelconque, c'est-à-dire à la fois des charges axiales et des charges radiales. Suivant la valeur du rapport F_r/F_a, on choisit le type de roulement à utiliser : à rouleaux cylindriques, à rouleaux coniques, à aiguilles par exemple (*fig.* 56).

Un type de roulement très important est le roulement à rotule sur billes ou sur rouleaux (*fig.* 57). Il permet de supporter la charge, bien entendu, mais il peut suivre la déformation de flexion de l'arbre.

L'arbre supposé sur deux appuis simples fléchit sous l'action des efforts dont la résultante radiale est F (*fig.* 58) ; au niveau des appuis, l'axe de l'arbre n'est plus horizontal, mais incliné d'un certain angle α. Les roulements à rotules peuvent supporter un angle d'inclinaison α important : c'est l'*angle de rotulage ;* il est de quelques degrés.

Règles de montage

La règle fondamentale est de prévoir un ajustement serré de la bague mobile par rapport à la charge.

Prenons l'exemple d'un arbre de scie circulaire ; la charge (l'effort de sciage) est de direction fixe par rapport au bâti de la scie ; en revanche, l'arbre est tournant, c'est lui qui entraîne la scie. La bague intérieure du roulement, c'est-à-dire celle qui est en contact avec l'arbre, est donc mobile par rapport à la charge ; c'est cette bague qui devra être serrée.

Supposons qu'il y ait jeu entre l'arbre et la bague intérieure du roulement, la différence de diamètre, bien sûr, est faible ; cependant, pour un arbre tournant à 3 000 tours/minute, une différence de diamètre de quelques centièmes de millimètre entraîne rapidement un retard de la bague de quelques tours. La bague, étant plus grande que l'arbre, tourne légèrement moins vite que celui-ci, ce qui produit un effet laminoir : la bague se trouve laminée entre l'arbre et les éléments roulants ; il y a alors allongement de la longueur circonférentielle de la bague qui se traduit par un accroissement de diamètre ; cela, d'ailleurs, amplifie l'effet de laminage, mais surtout réduit le jeu interne du roulement, ce qui est néfaste au bon fonctionnement, nous en avons discuté précédemment.

Le même type de phénomène (moins accentué toutefois) se produit si c'est la bague extérieure qui est mobile par rapport à la charge ; il ne peut dans ce cas y avoir blocage du roulement, mais ce dernier prend un jeu exagéré.

fig. 58
F_r
axe réel de l'arbre
α
axe théorique de l'arbre
Richard Colin

Il est donc impératif de prévoir un assemblage serré de la bague mobile par rapport à la charge.

Pour procéder au montage, plusieurs solutions sont possibles : deux méthodes sont couramment employées. La première, qui consiste à utiliser une presse et à effectuer le montage à force du roulement, ne peut être envisagée que si l'appui pendant le montage se fait sur la bague qui est montée serrée ; sinon, l'effort de montage est transmis par les pistes et les corps roulants qui seront déformés ; il s'ensuivra irrémédiablement la destruction rapide du roulement et, dès la mise en service, des défauts de rotation.

Une autre méthode consiste à chauffer le roulement, obligatoirement dans un bain d'huile à la température de 80-90 °C, laquelle est grandement suffisante, le serrage n'étant jamais très important ; bien entendu, l'arbre est à la température de l'atelier ; après mise en place rapide du roulement, il suffit d'attendre le refroidissement pour obtenir le serrage désiré. Cette méthode est particulièrement efficace, car il n'y a pas frottement à force de la bague sur l'arbre pendant le montage, frottement qui provoquerait un arrachement de métal avec modification de forme et de dimension des pièces.

Bien souvent, en plus de l'ajustement serré de la bague mobile par rapport à la charge, il faut prévoir un système de blocage axial de cette bague, un écrou par exemple (*fig.* 59).

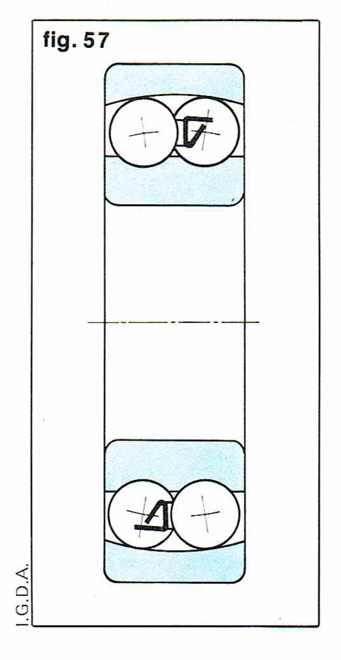
Les écrous utilisés sont des écrous spéciaux pour roulement ; ces écrous sont très plats pour réduire l'encombrement, et à pas fin ; ils peuvent être autofreinés ou employés avec rondelle-frein à dents ; l'écrou normal a quatre encoches, la rondelle est munie d'une dent intérieure pénétrant dans une rainure spécialement effectuée sur l'arbre, ce qui assure l'immobilisation en rotation de la rondelle. Après serrage de l'écrou, on rabat dans une encoche de ce dernier une dent de la rondelle, ce qui assure l'immobilisation en rotation de l'écrou.

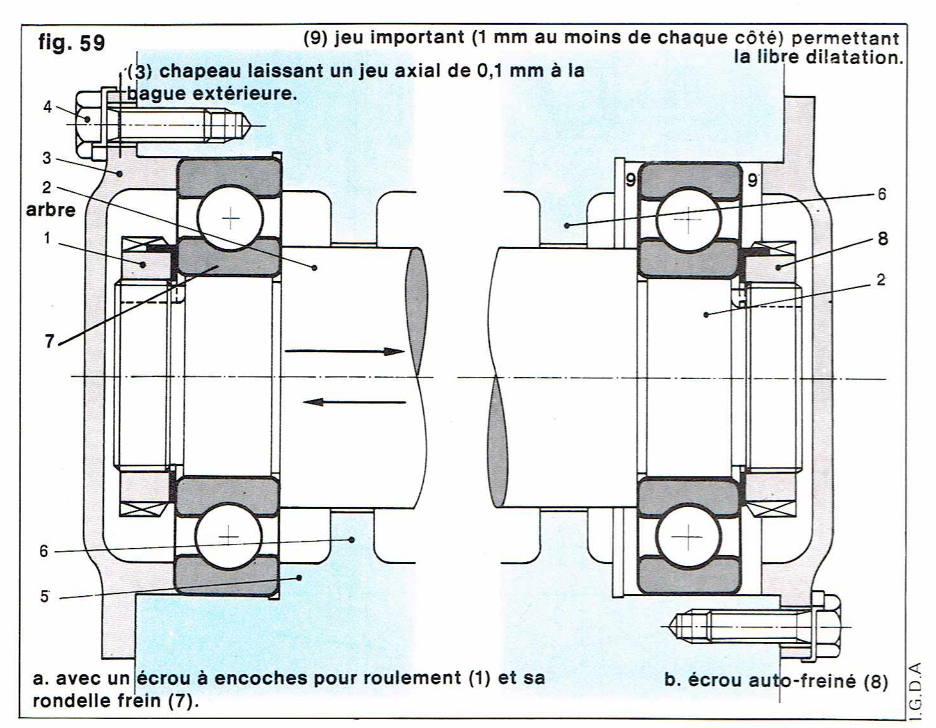
Il a été dit précédemment que la bague mobile par rapport à la charge est montée serrée ; la valeur du serrage est variable suivant la nature de la charge (choc, vibrations, etc.). L'autre bague, fixe par rapport à la charge, doit être libre ; l'ajustement prévu est du type glissant doux ; il faut prévoir en plus un léger jeu axial pour la bague libre d'un roulement, afin de permettre une automise en place de cette bague en début de fonctionnement.

La bague libre du 2e roulement sera montée avec un jeu axial important pour la libre dilatation des pièces, sinon un effort axial important va se développer lors de la dilatation et provoquer la destruction des roulements.

▲ *Figure 55 : composantes axiale (F_a) et radiale (F_r) des efforts supportés par un arbre guidé par un roulement à rouleaux coniques et un roulement à billes.*
Figure 56 ; différents types de roulements :
a) à rouleaux cylindriques ;
b) à aiguilles ;
c) à rouleaux coniques.
Figure 58 : flexion d'un arbre sous l'action d'un effort radial F_r.

▼ *Figure 57 : roulement à rotule à deux rangs de billes.*





▲ *Figure 59 : montages types de roulements à billes.*

Le principe général est simple :

La bague mobile	⟶	fixe
La bague fixe	⟶	mobile
par rapport à la charge		par rapport à la pièce

Dimensionnement des roulements

Pendant le service d'un roulement, les éléments roulants et la bague mobile par rapport à la charge supportent celle-ci en des points successifs; chaque élément se trouve donc chargé et libéré de façon répétitive; le métal se fatigue et finit par s'écailler après s'être fissuré; la durée de vie du roulement est alors largement dépassée. Il est préférable d'essayer de prévoir la durée probable de service du roulement. Pour cela, les fabricants procèdent à des essais statistiques de durabilité des roulements et indiquent pour chaque référence de roulement une charge C, appelée *capacité dynamique*, qui produit l'usure normale juste avant fissuration que doivent atteindre ou dépasser 90 % des roulements dans des conditions de vitesse données pour 1 million de tours.

Il est bien rare d'employer un roulement dans les conditions d'essais du fabricant; la charge et la vitesse d'utilisation sont différentes, et il y a chocs dans certains cas. Il faut donc corriger les données, et ce à l'aide d'une relation liant la durée L (en millions de tours), la capacité de base C et la charge équivalente P appliquée :

pour un roulement à billes, on a $L = \left(\frac{C}{P}\right)^3$

pour un roulement à rouleaux, $L = \left(\frac{C}{P}\right)^{\frac{10}{3}}$

Ayant calculé la durée en millions de tours, il est facile de déterminer la durée h en heures à la vitesse de rotation N tours/minute :

$$h = \frac{1\,000\,000\ L}{60 \cdot N}$$

La charge équivalente P est donnée par $P = XF_r + YF_a$. X et Y sont donnés en fonction du type de roulement suivant le rapport F_a/F_r.

Conditions de lubrification

Il faut prévoir la lubrification des roulements pour obtenir de faibles coefficients de roulement, mais aussi et surtout pour assurer le refroidissement. La lubrification se fait à l'huile ou à la graisse.

La *lubrification à la graisse* convient bien aux roulements travaillant en ambiance poussiéreuse, car la graisse a un bon pouvoir d'obturation; sa limite d'emploi est fonction de la vitesse de rotation et de la température d'utilisation. Les fabricants préconisent des graisses à la soude, à la chaux, mais surtout au lithium.

Pour assurer l'étanchéité, un joint feutre est souvent suffisant pour parer aux entrées de poussière et à la coulée de la graisse à l'extérieur.

Avec la *lubrification à l'huile*, il faut prévoir un système efficace d'étanchéité, car l'huile n'a pas de pouvoir d'obturation et, de plus, s'échappe facilement à l'extérieur. Il faut nécessairement utiliser un joint à lèvre et même un joint à deux lèvres : une antipoussière dirigée vers l'extérieur et une antifuite dirigée vers l'intérieur. Un ressort assure un maintien du contact lèvre-arbre; l'arbre doit être de préférence chromé pour éviter l'usure des joints.

On lubrifie avec des huiles minérales très fluides pour les rotations rapides, très visqueuses pour les roulements très chargés.

Il est à noter que bien des avaries ont pour source un excès de graissage qui provoque l'échauffement.

Il existe un type de roulement, fort pratique, qui est souvent employé dans les petits appareils et les appareils ménagers, c'est le *roulement étanche;* il possède ses propres joints et le graissage est effectué une fois pour toutes en usine au moment de l'assemblage des différentes pièces du roulement. La quantité de graisse convient tout à fait à l'utilisation (*fig.* 60).

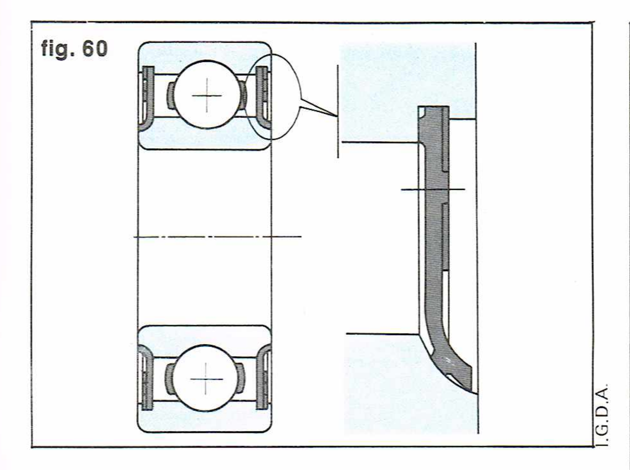
Exemples d'utilisation

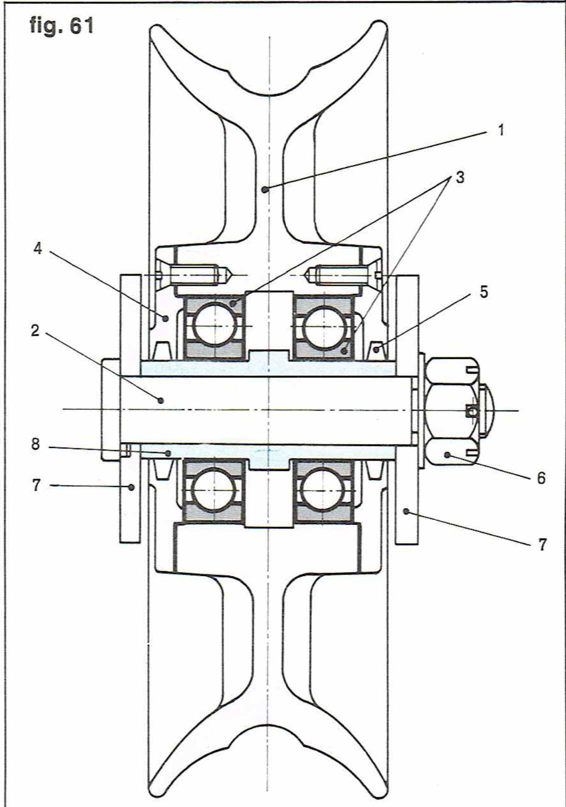
La *figure* 61 représente une roue pour câble de téléphérique. La roue (1) est portée par le support (7) par l'intermédiaire d'un axe (2) et de roulements à billes à

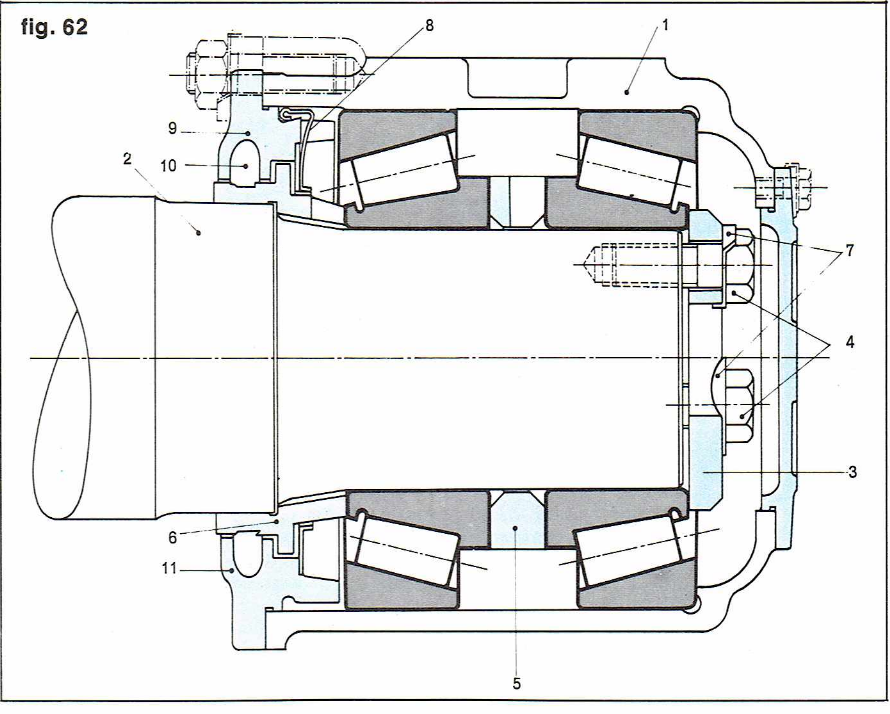




▶ *A gauche, roulement à rotule sur deux rangs de billes (RIV-SKF). A droite, roulement à rotule sur rouleaux (les rouleaux ont une forme de tonneau) [RIV-SKF].*







gorge profonde (3). Les flasques (4) portent des joints feutres placés dans les gorges trapézoïdales (5). La bague extérieure de chaque roulement est mobile par rapport à la charge; c'est cette bague qui est montée serrée dans l'alésage de la poulie. Les bagues intérieures sont libres sur l'entretoise (8) qui porte un épaulement central de limite de déplacement axial.

L'axe (2) est lié aux flasques (4) par ergot; l'écrou (6) est un écrou à créneaux, goupillé sur l'axe après montage. L'ensemble est monté en pendule par les supports afin de permettre un débattement de l'ensemble qui s'aligne automatiquement pour assurer le bon fonctionnement du système.

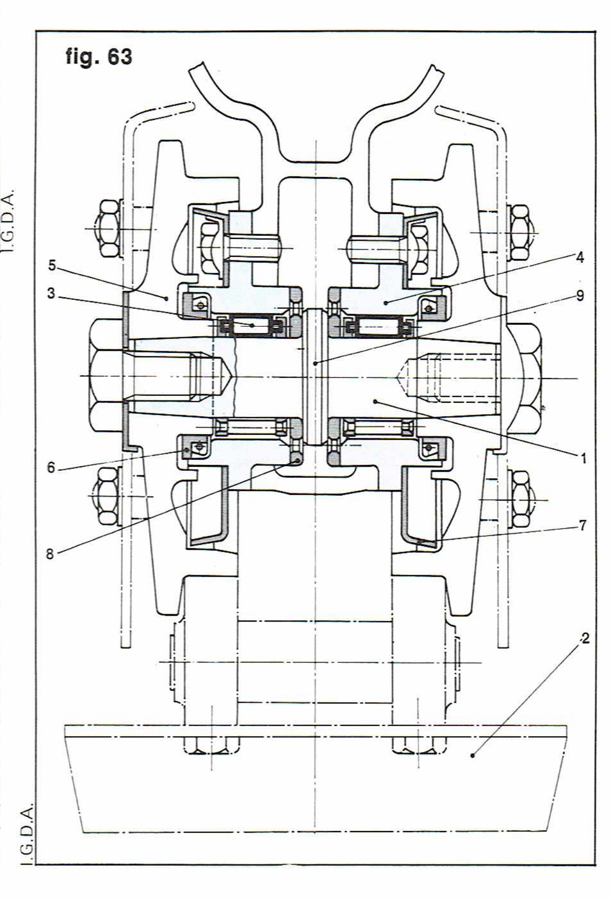
La *figure* 62 illustre le montage d'une boîte d'essieu de boggie de wagon de chemin de fer.

La boîte d'essieu (1) est boulonnée au châssis; l'arbre porte-roues (2) est monté sur quatre roulements à rouleaux coniques (deux par boîte); chaque paire de roulements est montée en X, ce qui permet d'éviter le balancement latéral du wagon et améliore le confort en courbes et aux raccordements. Une rondelle (3) bloquée par trois vis (4) disposées à 120° assure le serrage des bagues de roulement dont l'écartement est assuré par l'entretoise (5). La pièce d'appui (6) permet de conserver un arbre à variation de diamètre très progressive, tout en donnant un bon appui au roulement de gauche; de plus, cette pièce (6), par sa forme extérieure, forme turbine d'huile par le grand disque et constitue un labyrinthe qui pare aux entrées de poussières. L'étanchéité est améliorée par la rondelle métallique (8) qui est très près de l'appui (6).

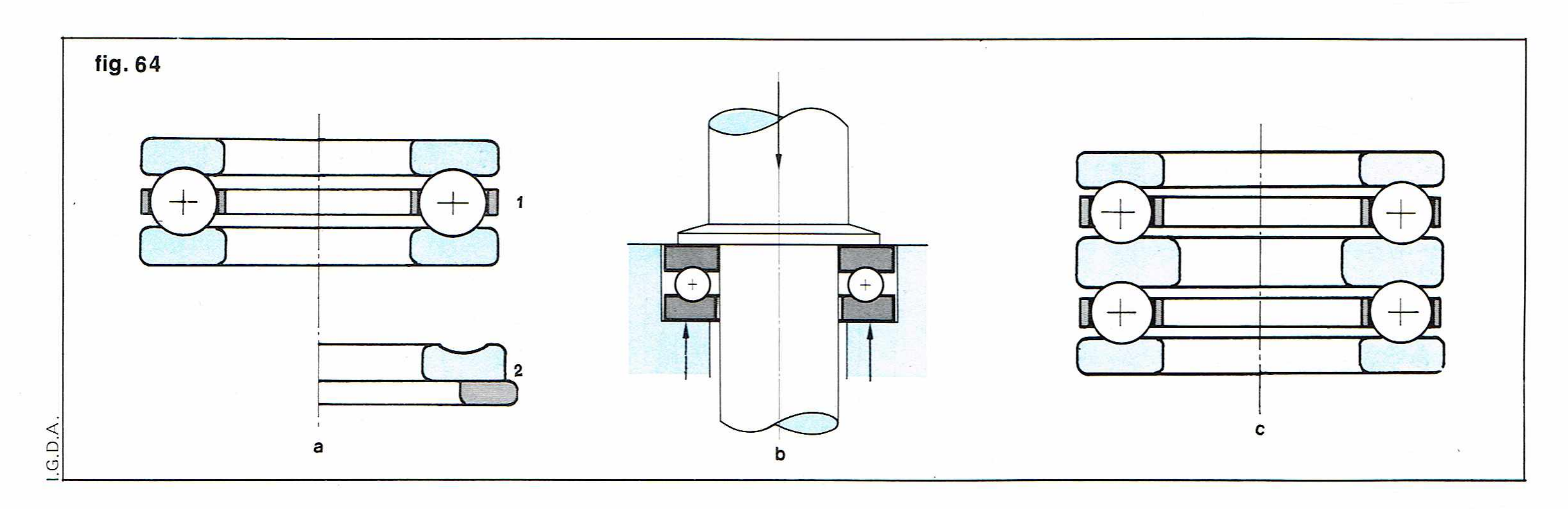
Des plaquettes arrêtoir (7) assurent l'immobilisation des vis (4); une extrémité de la plaquette est repliée dans l'alésage (3), l'autre extrémité est rabattue sur un plat de la vis (4).

La *figure* 63 montre le montage d'une roue postérieure de guidage de pont roulant, cette roue servant au guidage

◀▲ ***Figure 60 :* roulement étanche à deux joints.**
***Figure 61 :* roue de renvoi de téléphérique montée sur roulements à billes à gorges profondes.**
***Figure 62 :* boîte d'essieu de boggie de wagon, à deux roulements à rouleaux coniques montés en X (voir développement dans le texte).**



◀ ***Figure 63 :* montage d'un galet de chemin de roulement de portique de pont roulant (voir développement dans le texte).**



▲ *Figure 64 : a) butée simple effet; b) disposition des efforts sur une butée simple effet; c) butée double effet.*

au sol du portique sur ses rails (2). Le galet antérieur est moteur, il assure le déplacement; le galet postérieur joue seulement un rôle dans le guidage; c'est le rail et le déplacement du portique qui assurent la rotation des deux roues (5).

Les roues à jante sont assemblées par cône sur l'axe (1), ce qui garantit la parfaite concentricité sans jeu du chemin de roulement et de l'axe. Un montage cylindrique nécessiterait un emmanchement avec serrage, sinon il y aurait mouvement de rotation entre chacune des roues et l'axe, qui provoquerait des déformations des pièces.

Le montage est fait à l'aide de roulements à aiguilles sans bagues; de ce fait, l'axe (1) et les supports (4) jouent le rôle de bagues et sont en acier trempé rectifié.

Les deux pièces (8) en métal antifriction assurent le maintien latéral par l'épaulement (9) de l'axe. Ces pièces sont percées pour permettre le graissage des roulements. La protection est double : un disque (7) évite l'introduction des pulvérulents et un joint (6) assure l'étanchéité.

Roulement de butée pour charge axiale

Lorsque l'effort est purement axial, un système de butée permet le mouvement relatif de rotation. Il est constitué dans le cas de la butée simple effet par deux rondelles portant les pistes et des billes ou quelquefois des rouleaux coniques. La butée simple effet ne supporte l'effort axial que dans un sens (*fig.* 64). La butée double effet peut supporter un effort axial alterné. Pour la butée double effet, l'arbre prend appui sur la rondelle intermédiaire double piste. Le guidage en rotation de l'axe ne peut être assuré par la butée pure; il devra l'être par ailleurs comme dans la *figure* 65 représentant une contre-pointe tournante de tour.

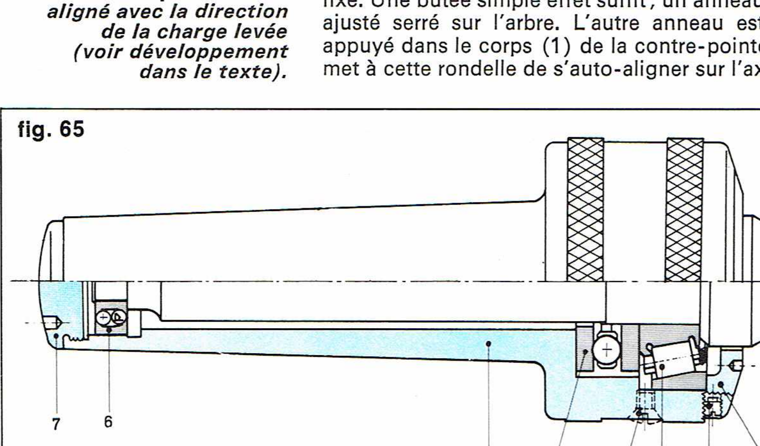
On distingue un roulement à rotule à deux rangées de billes (6) et un roulement à rouleaux coniques (3) qui effectuent le guidage en rotation et supportent l'effort radial.

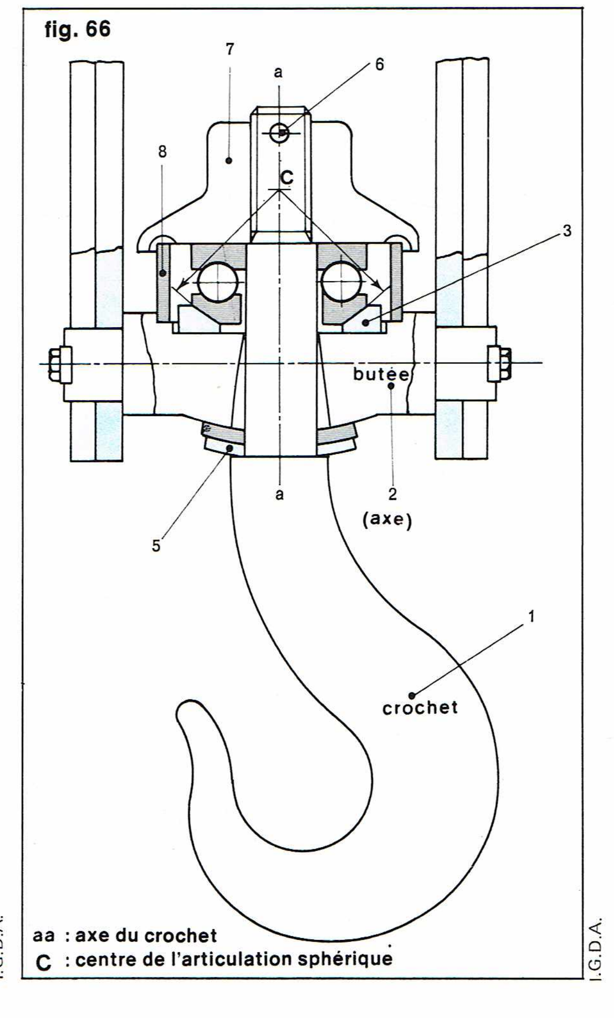
Dans cette disposition, l'effort axial est de direction fixe. Une butée simple effet suffit; un anneau de butée est ajusté serré sur l'arbre. L'autre anneau est simplement appuyé dans le corps (1) de la contre-pointe, ce qui permet à cette rondelle de s'auto-aligner sur l'axe de rotation défini par les deux roulements (6) et (3). Un espace est prévu pour la libre mise en place de la rondelle d'appui.

La vis (4) pour clef à ergots assure un serrage initial de la butée (2) et du roulement (3) de telle façon que sous les efforts la déformation des pièces ne puisse pas provoquer un jeu néfaste à la précision. La vis chapeau (4) est freinée en position par une vis sans tête (5) et une pastille de Nylon ou de cuivre. La vis (8) obture l'orifice de graissage.

Le crochet de levage (1) de la *figure* 66 illustre le montage sphérique d'une butée; dans ce cas, une rondelle supplémentaire à portée sphérique est utilisée (3), sphère centrée en C; une contre-butée (5) de même centre maintient l'ensemble. (8) est un fourreau de protection. L'écrou (7) doit être usiné pour permettre le pivotement du crochet sans s'appuyer sur (8), d'où la présence d'une gorge.

▼▶ *Figure 65 : montage d'une contre-pointe tournante de tour. Figure 66 : montage d'un crochet de levage à articulation sphérique, laquelle permet au crochet de rester en permanence aligné avec la direction de la charge levée (voir développement dans le texte).*





Transformations de l'énergie électrique en énergie électrique

Transformateurs

Un transformateur statique est un appareil fixe à induction électromagnétique qui a pour rôle de transformer un système de courants alternatifs en d'autres systèmes de courants alternatifs de même fréquence, mais généralement de tensions et d'intensités différentes.

Les transformateurs sont les appareils les plus répandus, car leur possibilité de transiter de l'énergie électrique à des tensions différentes en fait des éléments indispensables aussi bien pour les usages industriels que pour les usages domestiques.

Ils se présentent sous une très grande variété, depuis les très petits transformateurs de quelques dizaines de grammes utilisés en électronique jusqu'aux très gros transformateurs d'interconnexion entre réseaux ou de sortie de puissance des nouvelles centrales nucléaires dont les tensions couramment employées sont de 400 000 volts et les masses de quelques centaines de tonnes. Cette diversité provient des nombreux paramètres qui interviennent dans leur construction et peuvent influencer leur dimensionnement, par exemple la puissance, la fréquence, le nombre de phases, le nombre d'enroulements, les tensions, le système de refroidissement, les conditions de transport et d'installation...

Principe

Les transformateurs à fréquence industrielle se composent d'un circuit magnétique et d'enroulements primaire et secondaires. L'enroulement primaire est celui qui reçoit la puissance, les enroulements secondaires la restituent aux circuits extérieurs.

Le principe de fonctionnement et la théorie élémentaire sont les suivants : soit un circuit magnétique et deux enroulements possédant chacun n_1 et n_2 spires (*fig.* 67).

L'enroulement primaire, alimenté par le générateur, est parcouru par une intensité I_1 qui produit le flux Φ variable. Ce flux traverse l'enroulement secondaire et donne naissance à une force électromotrice $\vec{E}_2$ de par la relation générale :

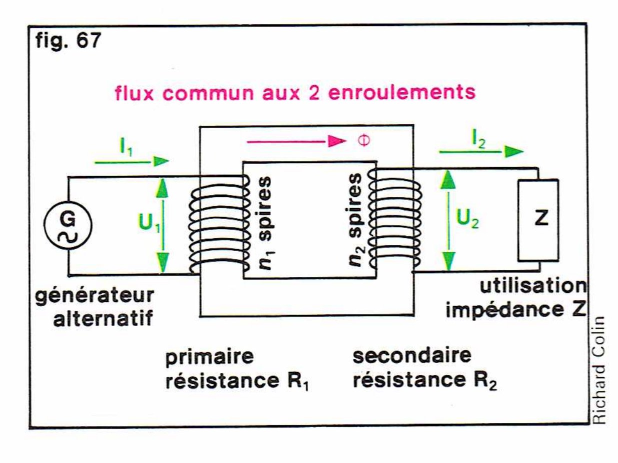
$$E_2 = n_2 \frac{d\vec{\Phi}}{dt}, \quad \text{or } \vec{\Phi} = \vec{B}S, \quad \text{donc } \vec{E}_2 = n_2 S \frac{d\vec{B}}{dt} = n_2 S\omega\vec{B}.$$

Réciproquement, nous aurions $\vec{E}_1 = n_1 S\omega\vec{B}$. Soit Φ le flux commun aux deux enroulements et $\mathcal{R}$ la réluctance du circuit magnétique, la loi d'Hopkinson nous donne $n_1\vec{I}_1 + n_2\vec{I}_2 = \mathcal{R}\vec{\Phi}$.

L'enroulement primaire se comporte comme un récepteur, la tension à ses bornes est donc donnée par l'équation : $\vec{U}_1 = -\vec{E}_1 + R_1\vec{I}_1$, l'enroulement secondaire se comporte comme un générateur dont la tension aux bornes est $\vec{U}_2 = \vec{E}_2 - R_2\vec{I}_2$.

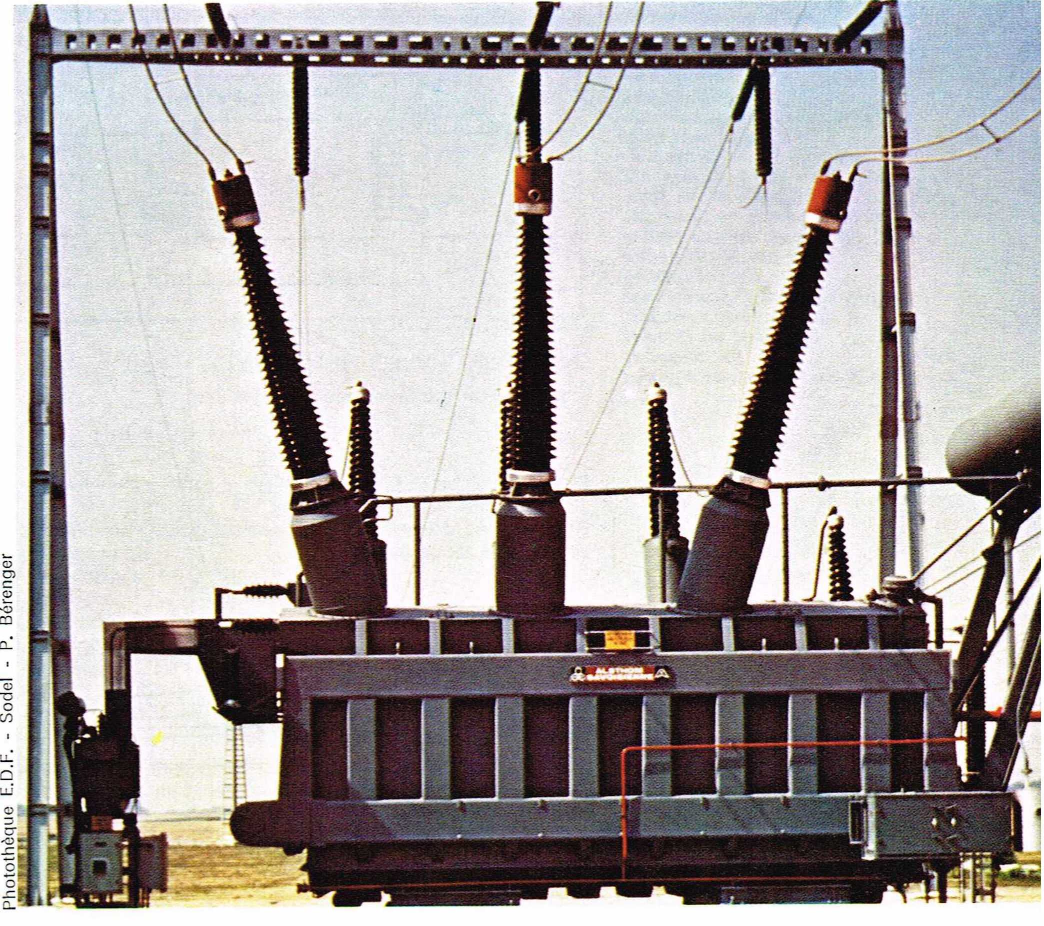
Théorie élémentaire

Dans la théorie élémentaire, on considère que le circuit magnétique est sans fuite, que la réluctance du circuit magnétique est nulle, que les pertes fer sont nulles et que les résistances des enroulements sont également nulles.



Richard Colin

◀ *Figure 67 : représentation schématique d'un transformateur à fréquence industrielle comprenant un circuit magnétique et des enroulements primaire et secondaire.*



Photothèque E.D.F. - Sodel - P. Bérenger

▲ *Autotransformateur de puissance 380 kV/225 kV du poste E. D. F. de Mezerolles.*

A partir de ces hypothèses, les relations principales sont :

Pour les tensions : $U_1 = -E_1, \quad U_2 = E_2, \quad \frac{E_1}{E_2} = \frac{n_1}{n_2},$

soit en valeur absolue : $\frac{U_2}{U_1} = \frac{n_2}{n_1} = m$, m est le rapport de transformation du transformateur, ce qui s'exprime : le rapport des tensions est sensiblement égal au rapport du nombre de spires.

Pour les intensités : $n_1I_1 + n_2I_2 = 0$

soit en valeur absolue : $\frac{I_2}{I_1} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{1}{m}$, ce qui s'exprime : le rapport des intensités est sensiblement égal au rapport inverse du nombre de spires.

Dans cette théorie élémentaire, nous voyons que les puissances absorbée et fournie sont égales : $U_1I_1 = U_2I_2$.

Transformateur réel monophasé

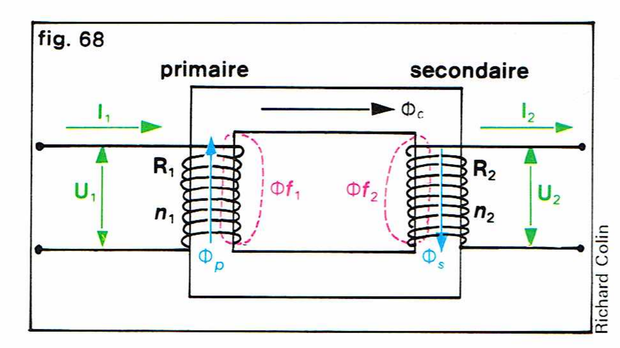
Dans l'étude du transformateur réel, il faut tenir compte des fuites du circuit magnétique, de la résistance des enroulements, des pertes fer et de la réluctance du circuit magnétique. Soit un transformateur monophasé ayant les caractéristiques suivantes : R_1 et R_2 les résistances des enroulements primaire et secondaire, $l_1\omega$ et $l_2\omega$ les réactances de fuites, U_1 et U_2 les tensions, I_1 et I_2 les intensités, n_1 et n_2 le nombre de spires, Φ_c le flux commun aux deux enroulements, Φ_{f1} et Φ_{f2} les flux de fuite, φ_1 et φ_2 les déphasages entre tensions et intensités primaires et secondaires (*fig.* 68).

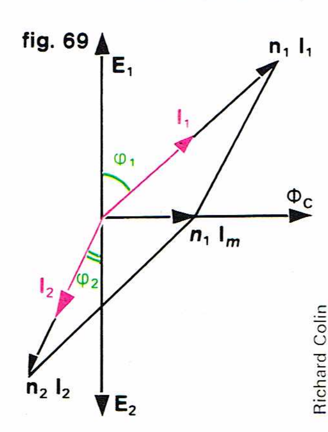
Pour ramener les flux aux intensités, on ne se sert pas des coefficients d'auto-inductance et de mutuelle inductance, car ils sont variables avec la tension, la perméabilité du circuit magnétique variant suivant l'état magnétique. On prend des coefficients d'auto-inductance de fuite qui sont constants puisque les lignes de force se ferment dans l'air, dont la perméabilité $\mu_0 = 4\pi\, 10^{-7}$ est invariable.

Les relations fondamentales des transformateurs réels sont obtenues de la façon suivante :

$\Phi_p = \Phi_c + \Phi_{f1}$ et $\Phi_s = \Phi_c + \Phi_{f2}$, à Φ_{f1} et Φ_{f2} correspondent des inductances $l_1 = n_1 \frac{\Phi_{f1}}{I_1}$ et $l_2 = n_2 \frac{\Phi_{f2}}{I_2}$ bien définies.

▶▼ *Figure 68 : schéma et caractéristiques d'un transformateur monophasé. Figure 69 : représentation graphique montrant que, pour le transformateur schématisé sur la figure 68, les intensités primaire et secondaire ne sont pas en opposition de phase par la présence du courant $\vec{I}_m$ ($\vec{I}_m$ = courant magnétisant dont on peut obtenir la valeur en faisant fonctionner le transformateur à vide).*





De $\Phi_p = \Phi_c + \Phi_{f1}$, on peut écrire $E_{p1} = E_1 + E_{f1}$.

L'équation primaire (récepteur) s'écrit :

$$U_1 = -E_{p1} + R_1I_1 = -E_1 - E_{f1} + R_1I_1$$

or, $E_{f1} = -l_1\frac{dI_1}{dt} = -l_1\omega I_1$, donc $\vec{U}_1 = -\vec{E}_1 + R_1\vec{I}_1 + \overrightarrow{l_1\omega I_1}$.

Si nous faisons le même raisonnement pour l'enroulement secondaire, nous obtenons :

$$\vec{U}_2 = \vec{E}_2 - R_2\vec{I}_2 - \overrightarrow{l_2\omega I_2}$$

En reprenant les équations de la théorie simplifiée, nous remarquons que $U_1 \# E_1 = n_1S\omega B$, équation qui montre que l'induction est constante si la tension primaire est constante ; or, cette induction est produite par les ampères-tours magnétisants qui, de ce fait, sont constants. Ils sont liés pour le primaire et le secondaire par la relation $n_1\vec{I}_1 + n_2\vec{I}_2 = n_1\vec{I}_m =$ Cte ; I_m est le courant magnétisant dont on peut facilement obtenir la valeur en faisant fonctionner le transformateur à vide. En effet, dans ce cas, $I_2 = 0$, donc $n_1\vec{I}_{10} = n_1\vec{I}_m$, soit $\vec{I}_{10} = \vec{I}_m$; l'intensité primaire à vide I_{10} mesure le courant magnétisant en négligeant le courant actif très faible dû aux pertes fer.

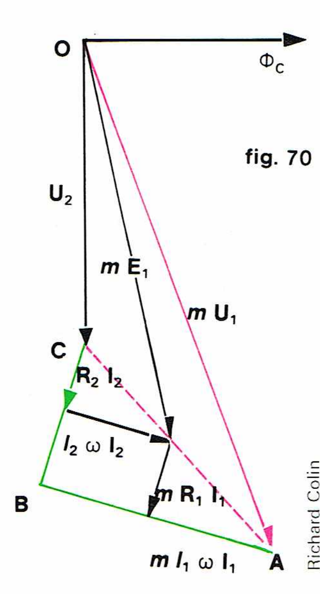
La représentation graphique montre que les intensités primaire et secondaire ne sont pas en opposition de phase de par la présence du courant I_m. Notons qu'en réalité φ_2 est très peu différent de φ_1 (*fig.* 69).

L'étude réelle et les cas de fonctionnement en charge sont exprimés clairement par l'étude suivante simple qui aboutit à l'équation de Kapp. Représentons graphiquement les équations $\vec{U}_1 = -\vec{E}_1 + R_1\vec{I}_1 + \overrightarrow{l_1\omega I_1}$ et

$$\vec{U}_2 = \vec{E}_2 - R_2\vec{I}_2 - \overrightarrow{l_2\omega I_2}$$

après avoir multiplié par m et tourné de 180° le diagramme relatif au primaire. Nous voyons (*fig.* 70) que $m\vec{U}_1 = \vec{U}_2 + \overrightarrow{CB} + \overrightarrow{BA}$ avec $CB = R_2I_2 + mR_1I_1$, or $I_1 = mI_2$, donc $CB = (R_2 + m^2R_1)\,I_2 = RI_2$, R est appelé *résistance totale du transformateur ramenée au secondaire.* De même, $BA = l_2\omega I_2 + ml_1\omega I_1 = (l_2\omega + m^2l_1\omega)\,I_2$

$BA = l\omega I_2$, $l\omega$ est appelé *réactance totale du transformateur ramenée au secondaire.*

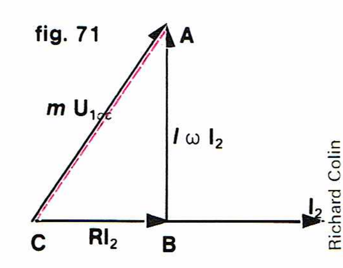


L'équation de Kapp est $m\vec{U}_1 = \vec{U}_2 + \overrightarrow{RI_2} + \overrightarrow{l\omega I_2}$ et ne comporte, dans le deuxième membre, que les valeurs secondaires. Le diagramme relatif à cette équation permet de prédéterminer la plupart des cas de fonctionnement. Son utilisation nécessite la détermination de R et $l\omega$. R est calculée à partir d'une mesure des résistances d'enroulement en courant continu après avoir fait un essai à vide pour connaître le rapport de transformation (s'il n'est pas indiqué par ailleurs) ; $l\omega$ est obtenu à partir d'un essai en court-circuitant l'enroulement secondaire et en appliquant au primaire une tension réduite dont la valeur permet d'avoir une intensité secondaire voisine de l'intensité nominale. L'équation de Kapp devient :

$$\overrightarrow{mU_{1cc}} = \overrightarrow{RI_2} + \overrightarrow{l\omega I_2}, \text{ d'où } l\omega I_2 = \sqrt{CA^2 - CB^2} \quad (\textit{fig. } 71).$$

Considérons quelques exemples de fonctionnement.

▲▼ *Figures 70 et 71 : voir développement dans le texte.*



Premier exemple

Un réseau alimente un utilisateur qui possède un transformateur abaisseur entre le réseau et l'utilisation. Connaissant les caractéristiques du transformateur, comment doit varier la tension primaire en fonction de la charge : I_2 variable et φ_2 variable, si l'on veut garder constante la tension secondaire ? Répondons à cette question en trois temps.

* *Premier temps*

I_2 variable, φ_2 constant. La tension primaire est égale à $\frac{OA}{m}$. Nous voyons qu'il faut augmenter U_1 (OA' est supérieur à OA) quand la charge augmente pour garder U_2 constante (*fig.* 72).

* *Deuxième temps*

I_2 constant, φ_2 variable. Ici le point A correspond à une intensité donnée, donc la grandeur CA est invariable, mais il se déplace sur un cercle de centre C et de rayon CA. Nous voyons que, pour certaines valeurs de déphasage avant, la tension du réseau devra diminuer si l'on veut garder U_2 constant (*fig.* 73).

* *Troisième temps*

I_2 et φ_2 variables. La représentation est la superposition des deux figures ci-dessus. Il suffit de placer le point de fonctionnement A pour lire la valeur de la tension U_1 sur les arcs de cercle représentés en pointillé (*fig.* 74).

Deuxième exemple

Un réseau alimente un utilisateur sous une tension constante. Un transformateur abaisseur est monté entre le réseau et l'utilisation. Connaissant les caractéristiques du transformateur, comment varie la tension secondaire en fonction de la charge ? Comme pour l'exemple précédent, en premier lieu on considère I_2 variable et φ_2 constant et en deuxième lieu I_2 constant et φ_2 variable. Le résultat final est obtenu par superposition des deux figures (*fig.* 75 et 76).

Chute de tension

La chute de tension en charge est égale à $mU_1 - U_2$ (*fig.* 77). Le calcul exact est obtenu à partir des projections sur l'axe des x et l'axe des y des vecteurs $\overrightarrow{OC}$, $\overrightarrow{CB}$ et $\overrightarrow{BA}$. Projections sur Ox : $U_2 + RI_2\cos\varphi_2 + l\omega I_2\sin\varphi_2$. Projections sur Oy : $-RI_2\sin\varphi_2 + l\omega I_2\cos\varphi_2$.

$$mU_1 = \sqrt{\overline{\text{projections sur } Ox}^2 + \overline{\text{projections sur } Oy}^2}$$

projections sur Ox, d'où :

$$mU_1 - U_2 = RI_2\cos\varphi_2 + l\omega I_2\sin\varphi_2$$

Un ordre de grandeur des valeurs des chutes de tension est donné par le tableau suivant en fonction du facteur de puissance.

Puissance du transformateur en kVA		5	100	500	1 000
Chute de tension en %	$\cos\varphi = 0,8$	5	>4	4	4
	$\cos\varphi = 1$	3	2	1,5	<1,5

La tension secondaire peut être ajustée en fonction des besoins, soit hors tension, soit en charge. Dans le premier cas, le transformateur est isolé du réseau et le réglage se fait à l'aide de prises supplémentaires raccordées à des bornes disposées sur le couvercle du transformateur. Le changement de prises peut s'effectuer aussi au moyen d'un commutateur.

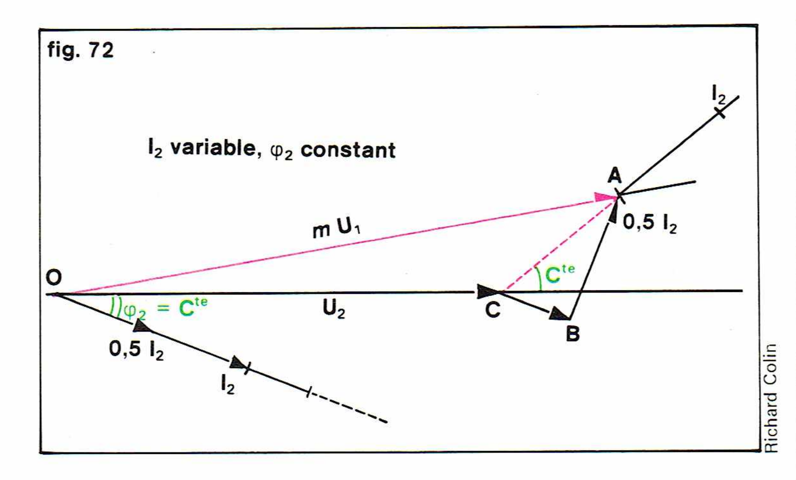
Ce commutateur est manœuvré de l'extérieur de la cuve par une commande appropriée. Dans le second cas, le commutateur est manœuvré en charge et les prises peuvent être disposées sur les enroulements primaire ou secondaire, au milieu ou à l'extrémité des enroulements. La *figure* 78 donne un exemple simplifié de montage avec résistance ou inductance de passage d'une prise à une autre, qui évite l'interruption au passage d'une prise à l'autre et le court-circuit de la portion de bobinage située entre les prises 1 et 2 quand les contacts ont lieu simultanément sur 1 et 2.

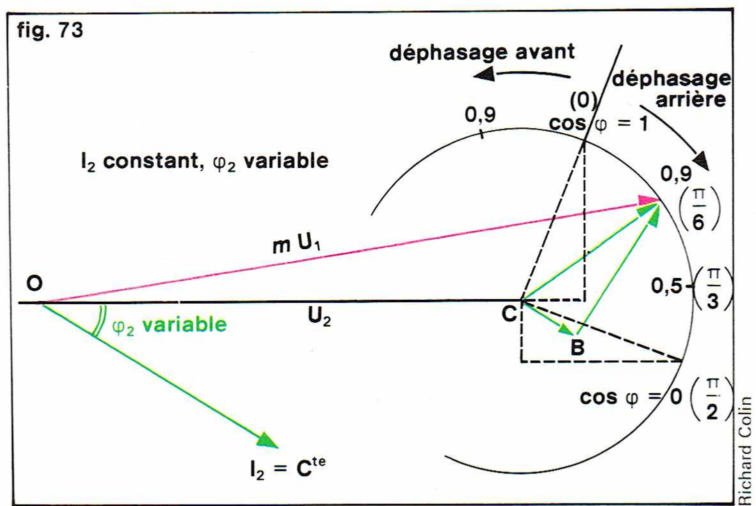
Rendement et pertes

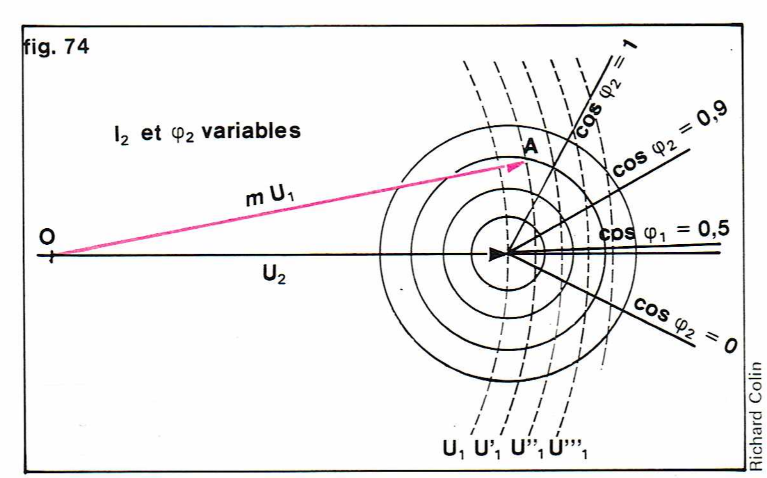
Le rendement est donné par le quotient de la puissance fournie P_2 et de la puissance absorbée P_1 : $\eta = \frac{P_2}{P_1}$, soit pour un transformateur monophasé

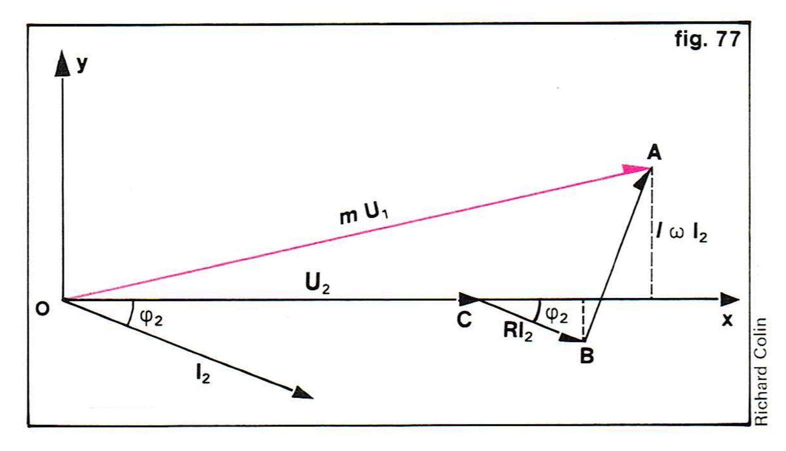
$$\eta = \frac{U_2I_2\cos\varphi_2}{U_2I_2\cos\varphi_2 + \text{pertes}}$$

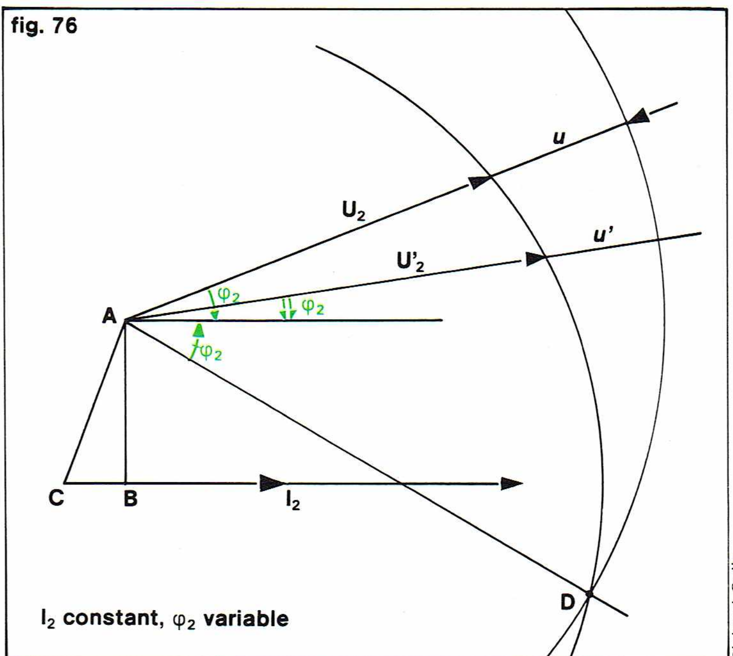
Le tableau page 256 donne un ordre de grandeur du rendement en fonction de la puissance apparente :

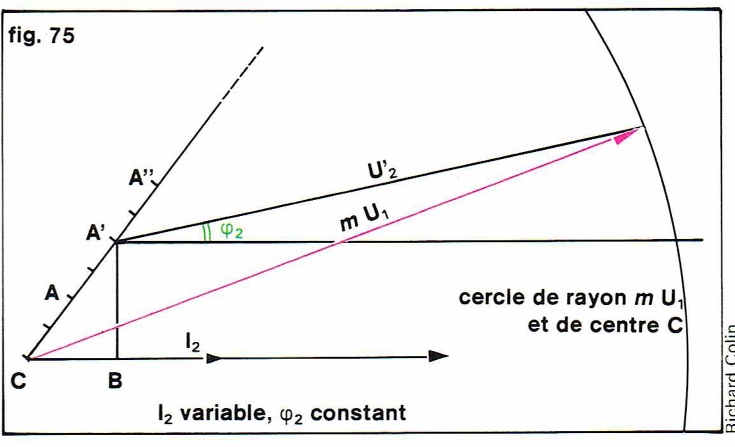




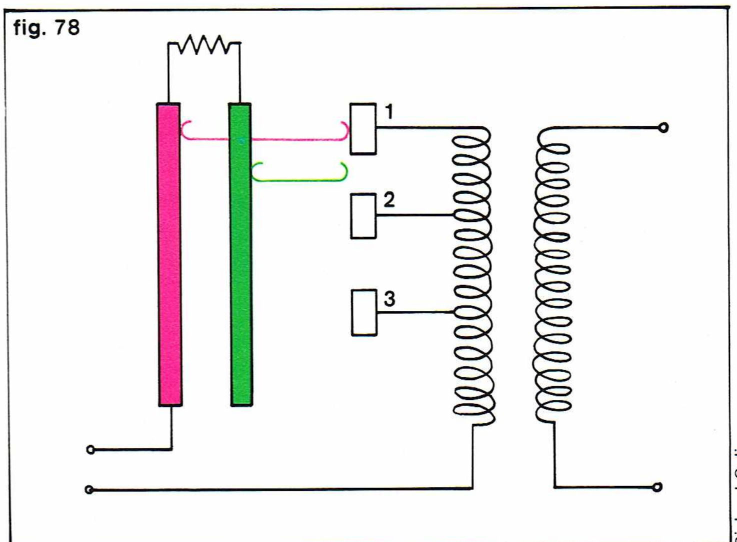




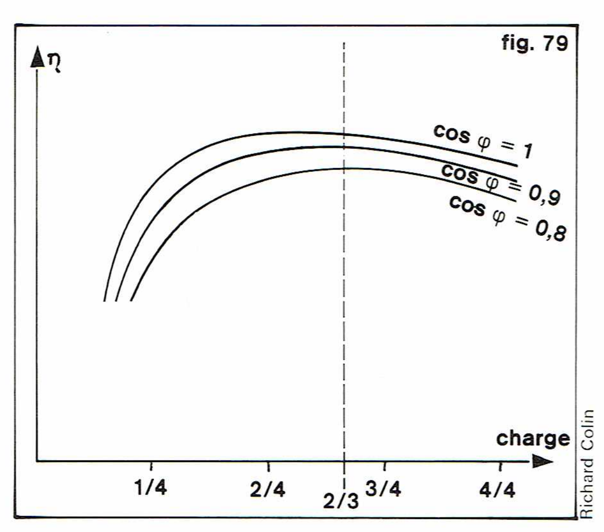


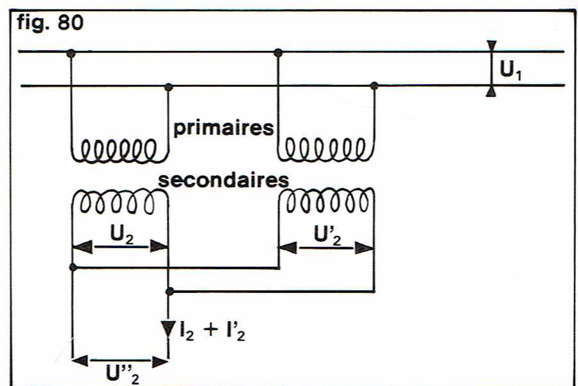


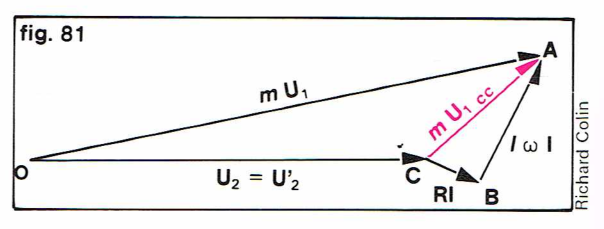
◀▲ ***Figures 72, 73, 74** : cas d'un transformateur abaisseur entre réseau et utilisation ; variations de la tension primaire U_1 en fonction de la charge (I_2, φ_2) pour garder constante la tension secondaire U_2.*
***Figures 75, 76** : cas d'un transformateur abaisseur monté entre un réseau alimentant un utilisateur sous une tension constante et l'utilisation. Variation de la tension secondaire U_2 en fonction de la charge (I_2, φ_2).*
▼ ***Figure 77** : transformateur monophasé : chute de tension en charge (égale à $mU_1 - U_2$).*
***Figure 78** : voir texte.*



▶ *Figure 79 ; transformateur monophasé : représentation graphique de la variation du rendement en fonction de la charge ; pour les unités de petite et de moyenne puissance, le rendement maximal se situe vers les 2/3 de la puissance nominale. Figures 80 et 81 : représentation schématique du couplage de transformation en parallèle et diagramme de Kapp correspondant.*







Puissance nominale en kVA	20	100	500	1 000
Rendement maximal à cos φ = 1	0,96	0,975	0,983	0,985

Pour un même appareil, le rendement n'est pas constant : il varie notamment avec l'intensité débitée et le cos φ. Pour les unités de petite et de moyenne puissance, dont la construction n'a pas été motivée par un cahier de charge bien précis, le rendement maximal se situe vers les deux tiers de la puissance nominale (*fig.* 79). Pour les autres unités, le constructeur cherche toujours le point de rendement maximal pour l'utilisation pour laquelle l'appareil a été spécialement construit. Les pertes ont pour origine : les pertes fer, les pertes cuivre, les pertes dues à l'utilisation des appareils de refroidissement et de contrôle-commande. Les pertes fer du circuit magnétique sont de deux sortes : les pertes par courant de Foucault et les pertes par hystérésis. Les pertes par courant de Foucault ont pour origine les variations du flux qui donnent naissance à des courants à l'intérieur des tôles et produisent des échauffements par effet Joule. C'est pour diminuer ces pertes que les circuits magnétiques sont constitués par un empilage de tôles de faible épaisseur isolées entre elles. Les pertes par hystérésis dépendent de la qualité des tôles. L'énergie calorifique perdue est proportionnelle à la surface du cycle ; c'est pourquoi on cherche des qualités d'acier ayant des surfaces de cycle minimales. D'autre part, la surface étant fonction de la saturation, il y a intérêt à fonctionner à faible induction, c'est-à-dire à augmenter la section de passage du flux en augmentant la section du circuit magnétique. Une étude économique est à faire pour arriver à un compromis rentable.

Les pertes cuivre par effet Joule proviennent de la circulation des courants dans les enroulements primaire et secondaires et ont pour valeur $P_J = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2$.

La mesure des pertes fer est obtenue par un essai à vide. L'enroulement primaire est alimenté sous la tension nominale U_1, le secondaire du transformateur est à circuit ouvert, l'intensité I_2 est nulle. L'enroulement primaire est parcouru par le courant magnétisant $I_m = I_{10}$. Un wattmètre mesure les pertes totales. Les pertes fer sont alors égales à la différence entre la lecture du wattmètre (W) et les pertes Joule de l'enroulement $P_f = W - R_1 I_{10}^2$.

Suivant la puissance des transformateurs, on utilise pour leur refroidissement des ventilateurs, des pompes de circulation du fluide de refroidissement ; leur consommation, ainsi que celle des organes de contrôle-commande rattachés à l'appareil, doit être prise en compte.

Couplages en série et en parallèle

Pour le couplage en série, il suffit de s'assurer que l'isolement par rapport à la masse est suffisant. Si par erreur les secondaires étaient montés en opposition, leurs tensions se retrancheraient au lieu de s'ajouter.

Pour le couplage en parallèle (*fig.* 80), il est indispensable de satisfaire à trois conditions : d'une part, en fonctionnement à vide, il ne doit exister aucun courant de circulation entre les deux secondaires $I_c = \dfrac{\overline{U} - \overline{U'}}{\overline{Z} + \overline{Z'}}$; pour cela, il faut que les tensions secondaires soient égales, ce qui s'obtient par l'égalité des rapports de transformation à vide. D'autre part, il faut l'égalité des tensions de court-circuit pour le courant nominal de chacun des transformateurs. Écrivons l'équation de Kapp, pour le premier transformateur :

$$m\vec{U}_1 = \vec{U}_2 + \overrightarrow{RI}_2 + \overrightarrow{l\omega I}_2 = \vec{U}_2 + m\vec{U}_{1cc} ;$$

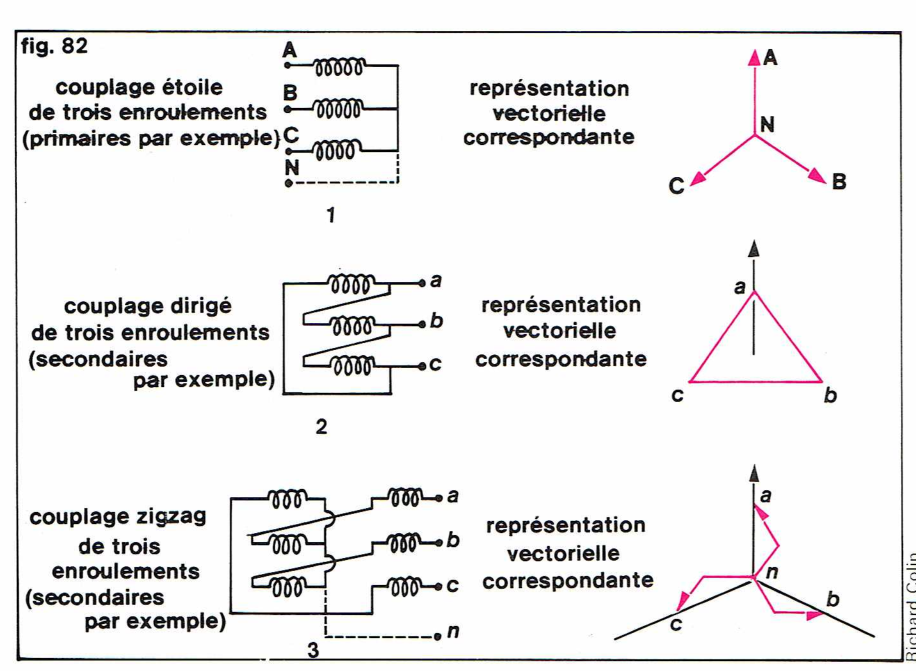
pour le second transformateur (*fig.* 81) :

$m\vec{U}_1 = \vec{U}_2 + \overrightarrow{R'I'}_2 + \overrightarrow{l'\omega I'}_2 = \vec{U'}_2 + m\vec{U'}_{1cc}$, nous voyons que pour avoir $\vec{U}_2 = \vec{U'}_2$ il faut que $mU_{1cc} = mU'_{1cc}$. Et enfin, pour qu'il n'y ait pas de circulation de courant, les deux secondaires doivent être en opposition.

Transformateurs triphasés

La transformation d'un système de courants alternatifs triphasés en un autre système de courants alternatifs triphasés de même fréquence peut être obtenue en connectant entre eux au primaire et au secondaire trois transformateurs monophasés. Ce montage est notamment utilisé pour les transformateurs de très grosses puissances pour lesquels se posent les contraintes de gabarits des ouvrages d'art au cours de leur transport. Généralement, on utilise un transformateur qui ne comprend qu'un circuit magnétique. Les enroulements sont reliés entre eux de façons

▼ *Figure 82 : trois modes de couplage utilisés pour relier les trois enroulements d'un transformateur triphasé et la représentation vectorielle correspondante ; 1, couplage étoile ; 2, couplage triangle ; 3, couplage zigzag.*



diverses suivant les modes de couplage : étoile ou triangle ou zigzag (*fig.* 82).

En régime équilibré, les couplages peuvent être quelconques ; par contre, en régime déséquilibré, certains couplages comme étoile-étoile sont à proscrire ; d'autres, triangle-étoile et étoile-zigzag, par exemple, sont conseillés. En effet, considérons le montage étoile-étoile ; branchons une impédance Z au secondaire entre une phase et le neutre. Le courant secondaire circule dans l'enroulement de la phase ***a*** et se referme dans Z ; aucun courant ne circule alors dans les autres enroulements secondaires (*fig.* 83). Ce courant I_2 crée un appel de courant I_1 dans l'enroulement primaire A qui doit se refermer obligatoirement par les deux autres phases B et C. Les ampères-tours primaires ne sont équilibrés par aucun ampère-tour secondaire ; le circuit magnétique se sature et donne naissance à des pertes fer importantes qui entraînent un échauffement exagéré.

Maintenant, considérons le montage triangle-étoile (*fig.* 84). Comme dans le cas précédent, branchons une impédance entre une phase du secondaire et le neutre. Le courant secondaire I_2 circule dans l'enroulement de la phase ***a*** et se referme dans Z, aucun courant ne circule dans les enroulements des phases ***b*** et ***c***. Au primaire, le courant I_1 appelé dans la phase A se referme directement en B sans traverser les autres enroulements. Les ampères-tours primaires et secondaires sont équilibrés alors qu'il n'y a qu'une seule phase qui débite, et le transformateur est en régime déséquilibré.

Pour les transformateurs triphasés, l'équation de Kapp peut être utilisée, à condition, dans certains cas, d'y adjoindre des coefficients. Si l'on connaît les couplages primaires et secondaires, il est préférable, pour éviter des erreurs, d'employer le diagramme de Kapp pour une colonne comprenant un enroulement primaire et un enroulement secondaire, qui constitue ainsi un transformateur monophasé. Il ne faut pas oublier de ramener les résultats *de colonne* en résultat *de ligne* vu des bornes qui intéressent l'utilisateur. Si le couplage est en triangle, la tension aux extrémités d'une colonne est la même que celle entre bornes ; si le couplage est en étoile, il faut multiplier les résultats obtenus par $\sqrt{3}$ pour obtenir les tensions entre bornes. Si l'on ne connaît pas les couplages primaires et secondaires, il faut faire les prédéterminations en utilisant les grandeurs vues des bornes (*fig.* 85). Si R'_1 et R'_2 sont les résistances des enroulements mesurées entre bornes sans ouvrir l'appareil, la chute ohmique sera donnée par la relation :

$$u = \frac{\sqrt{3}}{2} R' I_2 \cos \varphi_2 + l'\omega I_2 \sin \varphi_2.$$

R' et $l'\omega$ sont les *résistance totale et réactance totale du transformateur ramenées au secondaire du transformateur*. Le diagramme de Kapp correspondant est indiqué sur la *figure* 86.

Rendement et pertes

Le rendement d'un transformateur triphasé est

$$\eta = \frac{U_2 I_2 \sqrt{3} \cos \varphi_2}{U_2 I_2 \sqrt{3} \cos \varphi_2 + \text{pertes}}.$$

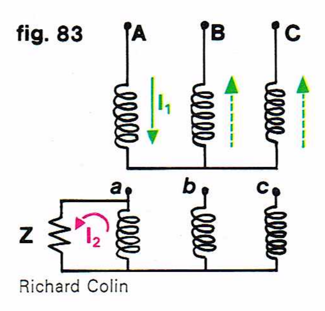
Les rendements sont très bons. Par exemple, un transformateur de 660 MVA peut avoir un rendement de 0,996 4. Soulignons que, malgré cette valeur élevée, la puissance à évacuer provenant des pertes est, pour un cos $\varphi = 0{,}9$, égale à $660 \times 0{,}9 \left(\frac{1 - 0{,}9964}{0{,}9964}\right) = 2{,}16$ MW. Comme pour les transformateurs monophasés, le rendement varie avec la charge et le facteur de puissance suivant des courbes de formes identiques à celles déjà dessinées.

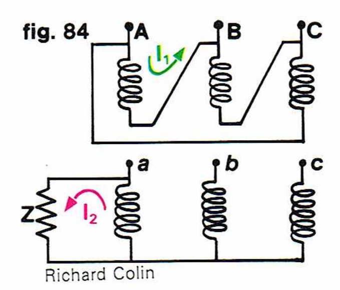
Couplage en parallèle

Les transformateurs triphasés ne peuvent être couplés en parallèle que s'ils satisfont aux conditions qui sont : égalité des rapports de transformation à vide, égalité des tensions de court-circuit pour le courant nominal de chacun des transformateurs, opposition des bornes correspondantes. Cette dernière condition peut présenter certaines difficultés. En effet, suivant les couplages utilisés, les déphasages sont différents entre primaire et secondaire. Utilisons les désignations symboliques normalisées des modes de connexion en respectant la forme des caractères employés : majuscules pour l'enroulement dont la tension d'épreuve est la plus élevée, minuscules pour un enroulement à plus basse tension :

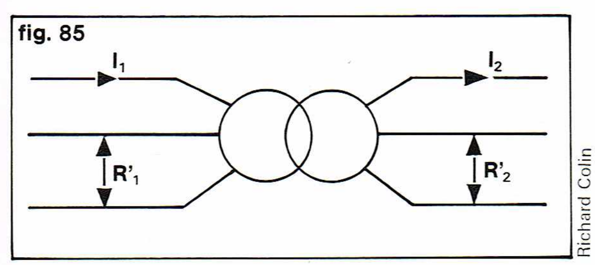
Triphasé étoile	Y	*y*
Triphasé étoile à neutre sorti	Y*n*	*yn*
Triphasé triangle	D	*d*
Triphasé zigzag à neutre sorti	Z*n*	*zn*

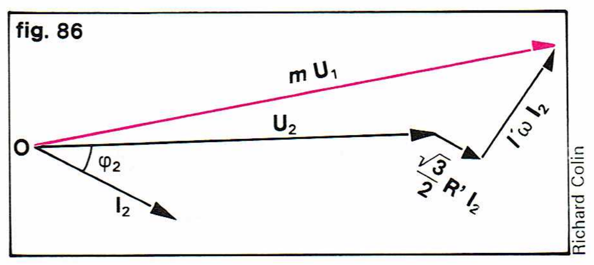
En monophasé, suivant la position des bornes secondaires, les tensions primaires et secondaires peuvent être en phase ou en opposition. Il en est de même en triphasé ; la représentation vectorielle d'un couplage Y-*d* par exemple montre que, suivant les sens relatifs de bobinage des enroulements, les modes de connexion des phases, les liaisons aux bornes, les tensions secondaires tournent par rapport aux tensions primaires (*fig.* 87). Cette rotation est exprimée par un indice horaire associé aux deux lettres du couplage. Cet indice indique les déphasages des forces électromotrices entre les bornes des enroulements par rapport aux forces électromotrices entre les bornes homo-



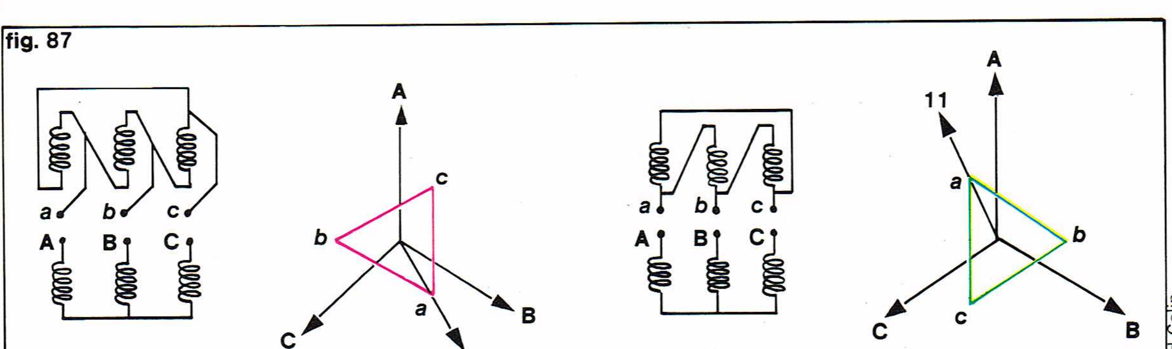


▲ ***Figures 83 et 84 : déséquilibre des ampères-tours dans le cas de fonction primaire en régime déséquilibré d'un transformateur triphasé ; fig. 83 : cas du couplage étoile-étoile ; fig. 84 : cas du couplage triangle-étoile.***





◀ ***Figure 85 : grandeur vue des bornes pour prédéterminer les caractéristiques quand on ne connaît pas les couplages primaires et secondaires. Figure 86 : diagramme de Kapp correspondant à la figure 85.***



◀ ***Figure 87 : représentation vectorielle pour 2 types de couplage (Yd_5 et Yd_{11}) montrant la rotation des tensions secondaires par rapport aux tensions primaires.***



Photo C.E.M.

▲ *Transformateur en cours de remontage après remise en état par les ateliers Repellec au Havre (10 MVA-90/5,8 kV).*

logues des enroulements ayant la plus haute tension et étant pris comme référence. Au centre d'un cadran, on place le point neutre réel ou fictif représentant les forces électromotrices étoilées des bornes de cet enroulement. Le vecteur correspondant à une borne A est placé à midi, les autres vecteurs des bornes B, C... suivent les chiffres du cadran. On opère de même pour le ou les enroulements à plus basse tension en faisant coïncider les points neutres. L'heure indiquée par le vecteur ***a*** donne l'indice horaire de cet enroulement.

Les transformateurs ayant le même indice horaire peuvent être branchés et fonctionner en parallèle. Si les indices horaires sont différents, il faut distinguer quatre groupes de couplage : le groupe I d'indices horaires 0,4 et 8, le groupe II d'indices horaires 6,10 et 2, le groupe III d'indices horaires 1 et 5 et le groupe IV d'indices horaires 7 et 11.

En changeant l'ordre de succession des phases, il est possible de brancher en parallèle deux transformateurs des groupes III et IV. Par contre, il n'est pas possible de faire les combinaisons du groupe I avec II ou III ou IV, du groupe II avec I ou III ou IV, du groupe III avec I ou II, du groupe IV avec I ou II.

Si le transformateur a un enroulement tertiaire, la lettre du couplage est entre parenthèses et les lettres se succèdent dans le sens décroissant des tensions, par exemple *Yn* (*d*11) y_0.

Les circuits magnétiques

Les circuits magnétiques se composent de *noyaux* qui sont les parties sur lesquelles on place les enroulements, et de *culasses* qui assurent les liaisons entre les noyaux. Ces ensembles, parcourus par un flux variable, nécessitent pour leur construction des tôles magnétiques minces, isolées les unes des autres pour réduire les pertes fer par hystérésis et courants de Foucault.

Les circuits magnétiques se divisent en deux grandes classes : les circuits magnétiques cuirassés et les circuits magnétiques à colonnes. Dans les premiers, les culasses sont disposées autour des enroulements à la manière d'une cuirasse. Dans les seconds, les noyaux ont la forme de colonnes et les culasses sont généralement courtes.

Les formes les plus caractéristiques des circuits cuirassés monophasés sont :

— Le circuit idéal où la culasse enveloppe complètement les enroulements.

— Le circuit « Berri », qui se compose d'un certain nombre de culasses autour d'un noyau central sur lequel sont placés les enroulements. Il est peu employé, car sa fabrication est compliquée.

— Le circuit à quatre culasses.

— Le circuit à deux culasses du type vertical en tôles roulées.

— Le circuit à deux culasses du type horizontal en tôle découpée.

— Le circuit à deux culasses du type vertical en tôle découpée.

Les formes les plus caractéristiques des circuits à colonnes monophasés sont :

— Le circuit à deux colonnes dont une seule est bobinée ; il peut être en tôle découpée ou roulée. D'une manière générale, il est employé pour des transformateurs de faible puissance et tension élevée.

— Le circuit à deux colonnes bobinées.

— Le circuit à quatre colonnes dont deux bobinées.

Sauf cas très particuliers, les circuits magnétiques sont fermés. A la fabrication, l'introduction des enroulements sur les noyaux nécessite l'ouverture par enlèvement d'une culasse. L'espace entre les tôles culasses-noyaux s'appelle joint.

Le circuit cuirassé triphasé est né de la juxtaposition de trois circuits monophasés ; il est employé pour les fortes puissances.

Parmi les circuits triphasés à colonnes, on peut noter :

— Le circuit triphasé symétrique où les trois noyaux sont placés au sommet d'un triangle équilatéral ; la culasse qui les réunit est circulaire.

— Le circuit triphasé à trois colonnes dans un même plan ; il est très employé, car il est très simple, mais les trois phases ont des réluctances différentes qui entraînent une légère dissymétrie dans le fonctionnement à vide.

— Le circuit triphasé à cinq colonnes dans le même plan dont trois seulement sont bobinées. Il permet de réduire la hauteur de la culasse, ce qui le rend plus facilement transportable dans le cas des grandes unités.

— Le circuit triphasé à cadres.

Quand les puissances sont très importantes, pour faciliter le transport, on utilise trois unités monophasées. Certaines utilisations particulières nécessitent des formes toriques, comme les transformateurs de mesure, pour lesquels les fuites doivent être les plus faibles possibles.

Les enroulements

Ils sont constitués de métaux bons conducteurs employés sous forme de fils cylindriques, barres rectangulaires ou feuilles. Ils sont isolés et enroulés sur des formes qui constituent des bobines. Le cuivre et l'aluminium sont les principaux métaux employés. L'aluminium a une résistivité supérieure de 63 % à celle du cuivre, qui entraîne des pertes par effet Joule proportionnelles. Sa résistance mécanique est plus petite, mais cela ne crée pas de difficulté d'emploi, hormis les jonctions pour lesquelles il faut prendre quelques précautions. On ne l'utilise pas seulement comme produit de remplacement, mais par exemple pour la construction de transformateurs de locomotives dont le poids doit être aussi faible que possible ; à conductances égales, un bobinage d'aluminium aura la moitié du poids d'un bobinage de cuivre. La feuille d'aluminium est utilisée dans certains transformateurs de distribution basse tension.

Les enroulements peuvent être *concentriques* ou *alternés*. Ils sont concentriques quand ils sont emboîtés l'un dans l'autre ; ils peuvent être *concentriques simples* ou *biconcentriques*. Ils sont alternés quand chacun des enroulements est subdivisé en tronçons de cylindre placés alternativement au montage l'un sur l'autre : BT, HT, BT, etc. Dans cette disposition, les tronçons extrêmes sont généralement en basse tension pour réduire l'isolement par rapport aux culasses. Les enroulements concentriques sont très utilisés, car ils sont sûrs et simples.

Pour les petites puissances, les enroulements basse tension sont cylindriques et constitués de fils ronds d'assez



Photo C.E.M.

▼ *Partie active du premier transformateur élévateur (20/235 kV) de puissance 760 000 kVA de la centrale E. D. F. de Cordemais ; ce transformateur a été mis sous tension le 15 avril 1976 sur le site.*

gros diamètre ou de méplats. Pour les fortes puissances, on subdivise le conducteur en plusieurs fils branchés en parallèle et placés côte à côte pour diminuer les courants de Foucault. Pour qu'ils aient des longueurs égales et embrassent le même flux, on les transpose de manière que chaque couche présente la même résistance et la même réactance de fuites. Pour les faibles puissances, les enroulements haute tension sont constitués de fils ronds de faible diamètre.

Généralement, l'enroulement est subdivisé en plusieurs bobines élémentaires branchées en série pour diminuer la tension entre couches. Quand la puissance augmente, le fil est remplacé par un méplat et, à la limite, l'enroulement se compose d'une pile de bobines à une spire par couche. Pour uniformiser la répartition de surtensions à front raide sans changer la capacité par rapport à la masse, on réalise des enroulements en couche qui sont des bobines à une couche emboîtées les unes dans les autres. Les enroulements alternés ,d'un emploi plus réduit, sont constitués par de grandes bobines plates du même type que celles à une spire par couche. Les bobines basse tension ont le même aspect que les précédentes.

Refroidissement

La propagation de la chaleur au sein des organes actifs depuis son lieu de production jusqu'au milieu ambiant se fait par conduction à l'intérieur de ces organes, par convection naturelle ou forcée dans les canaux de refroidissement et par rayonnement et convection naturelle ou forcée à la surface des parties extérieures.

Les différentes pertes donnent naissance à un échauffement qui, par définition, est la différence entre la température de la partie considérée et l'air de refroidissement ou le fluide de refroidissement à son entrée dans le dispositif permettant un échange de chaleur avec l'extérieur. Le tableau suivant donne les valeurs de l'échauffement en degrés Celsius en fonction des classes de température en fonctionnement nominal permanent :

Classe de température	Échauffement
A	60
E	75
B	80
F	100
H	125
C	⩾ 150

Les modes de refroidissement les plus utilisés sont :

— Transformateur à sec à refroidissement naturel pour des puissances de l'ordre de quelques centaines de kVA et des tensions inférieures à 20 kV; c'est un refroidissement naturel à l'air libre.

— Transformateur à sec à circulation forcée d'air pour des puissances de quelques milliers de kVA.

— Transformateurs immergés à refroidissement par circulation naturelle d'air pour des appareils placés dans des locaux humides, poussiéreux ou à ambiance corrosive; le circuit magnétique et les enroulements sont immergés dans une huile minérale qui favorise les échanges thermiques par convection et l'isolement; suivant les surfaces qu'il est nécessaire d'avoir en contact avec l'air pour évacuer les pertes, on utilise des cuves à parois planes, des cuves à ondulations, des cuves à tubes, des cuves à radiateurs accolés, des cuves à batteries de radiateurs indépendantes.

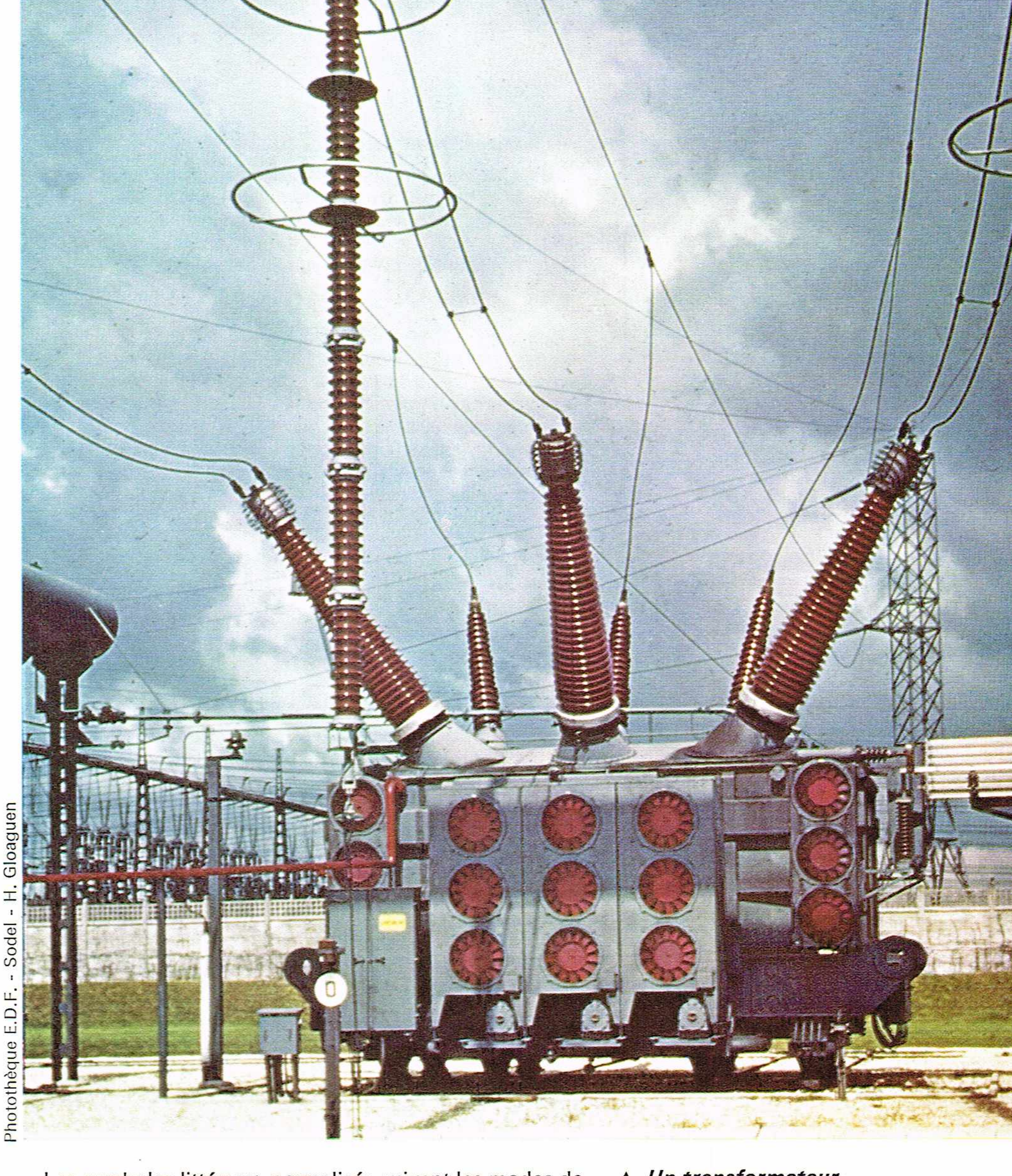
— Transformateurs immergés à circulation forcée de l'air de refroidissement; les ventilateurs de soufflage ont un fonctionnement intermittent et n'entrent en service que si la température dépasse la valeur préréglée.

— Transformateurs immergés à circulation forcée du liquide d'immersion et circulation naturelle de l'air de refroidissement.

— Transformateurs immergés à circulation forcée du liquide d'immersion et circulation forcée de l'air de refroidissement.

— Transformateurs à circulation naturelle du liquide d'immersion et à circulation forcée d'eau dans un serpentin placé dans la cuve.

— Transformateurs à circulation forcée du fluide d'immersion dans un hydroréfrigérant et circulation forcée de l'eau de refroidissement.



Photothèque E.D.F. - Sodel - H. Gloaguen

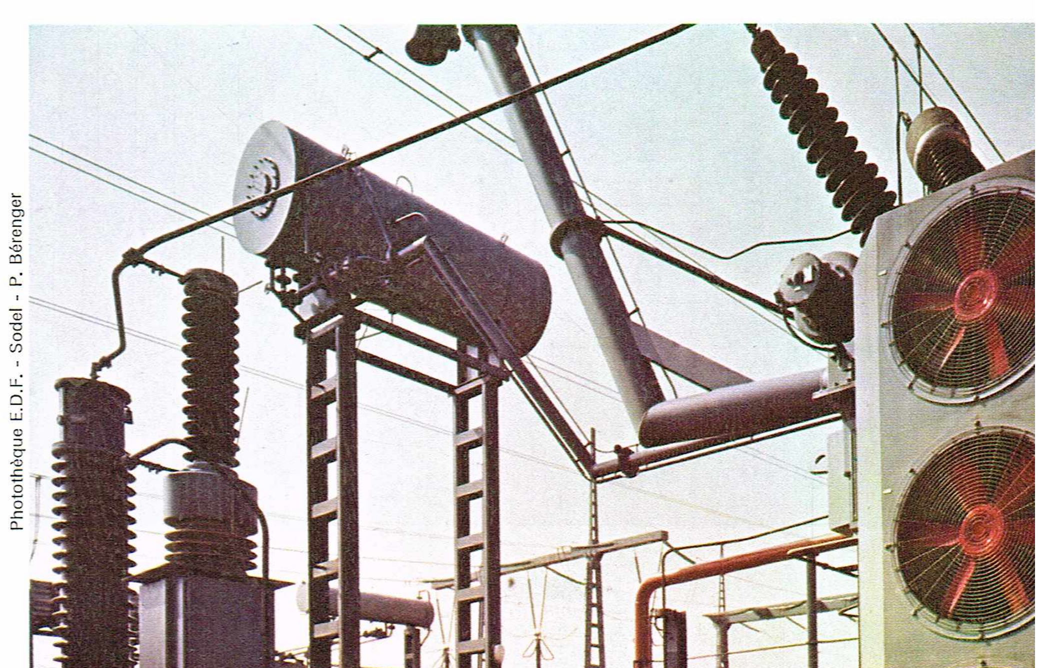
Les symboles littéraux, normalisés suivant les modes de refroidissement et la nature de la circulation, sont indiqués ci-dessous :

Fluide de refroidissement	Symbole
Air	A
Gaz	G
Askarel	L
Huile minérale	O
Isolant solide	S
Eau	W

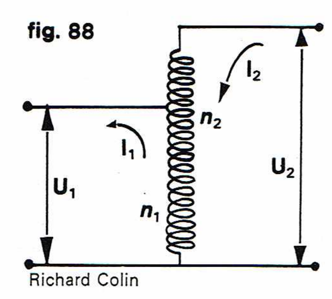
Nature de la circulation	Symbole
Forcée et dirigée	D
Forcée	F
Naturelle	N

▲ Un transformateur immergé dans l'huile. On remarque les ventilateurs de circulation forcée de l'air de refroidissement (cercles rouges).

▼ Détail des ventilateurs de circulation forcée de l'air de refroidissement du transformateur ci-dessus. Au second plan, le conservateur d'huile et la tuyauterie du reniflard-désamorceur.



Photothèque E.D.F. - Sodel - P. Bérenger



▲ *Figure 88 : représentation schématique d'un autotransformateur comprenant un circuit magnétique et un seul enroulement.*

Autotransformateur

Un autotransformateur se compose d'un circuit magnétique et d'un seul enroulement dont une partie constitue le second enroulement d'un transformateur ordinaire (*fig.* 88). Les formules du transformateur s'appliquent. Dans la théorie simplifiée, nous retrouvons

$$m = \frac{U_2}{U_1} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{I_1}{I_2}$$

en négligeant le courant magnétisant. Le courant qui traverse la partie commune est égal à la différence entre les courants primaire et secondaire. Il en résulte des conséquences intéressantes quand on fait la comparaison avec un transformateur ordinaire, notamment sur le poids de cuivre des enroulements et les pertes Joule. Le poids du cuivre est proportionnel aux intensités et au nombre de spires

$$P_{transfo} = \alpha\,(n_1 I_1 + n_2 I_2) \# 2\,\alpha n_2 I_2$$

$$P_{autotransfo} = \alpha\,[n_1\,(I_1 - I_2) + (n_2 - n_1)\,I_1] = 2\,\alpha\,(n_2 - n_1)\,I_2$$

d'où $$\frac{P_{autotransfo}}{P_{transfo}} = \frac{n_2 - n_1}{n_2} = 1 - \frac{n_1}{n_2} = 1 - \frac{1}{m}$$

Le même résultat est obtenu en calculant les pertes Joule si on considère que la résistance d'un enroulement est proportionnelle au nombre de spires et inversement proportionnelle à l'intensité qui le traverse. On conclut que le rendement est d'autant plus élevé que le rapport de transformation est près de l'unité. Si une coupure se produit dans la partie commune de l'enroulement, le courant qui la traverse est interrompu, la chute de tension interne est supprimée et la haute tension est reportée sur la basse tension, car il y a continuité du circuit électrique entre le primaire et le secondaire. De même, en cas de décharge atmosphérique, l'onde risque de se propager sur toute la ligne. Les transformateurs de grande puissance des postes d'interconnexion 380 kV/220 kV sont généralement des autotransformateurs.

Transformateurs de phases

La transformation d'un système triphasé en un système diphasé ou réciproquement s'effectue soit avec un transformateur Scott, soit avec un transformateur Leblanc.

Transformateur Scott

On utilise le plus souvent deux transformateurs monophasés. Le principe est le suivant si on raisonne dans le sens diphasé-triphasé : les deux enroulements primaires sont alimentés par un système diphasé représenté par deux vecteurs déphasés de $\frac{\pi}{2}$ (*fig.* 89). Pour obtenir un système triphasé, il faut créer un système de vecteurs formant un triangle équilatéral *abc*; le vecteur $\overrightarrow{ab}$ peut être obtenu avec le secondaire du premier transformateur. Pour avoir le point *c*, on prend le milieu M de *ab* à partir duquel on élève une verticale de longueur $\frac{ab\sqrt{3}}{2}$. Si l'enroulement *ab* comporte *n* spires, on relie la spire centrale au secondaire du deuxième transformateur qui a $\frac{n\sqrt{3}}{2}$ spires. Le neutre *n* se trouve aux 2/3 de *c*M.
Ce montage ne fonctionne bien qu'en régime équilibré.

Transformateur Leblanc

Il utilise un circuit magnétique triphasé. Le principe est le suivant si on raisonne dans le sens triphasé-diphasé : il faut obtenir deux vecteurs déphasés de $\frac{\pi}{2}$ à partir de trois vecteurs déphasés de $\frac{2\pi}{3}$ (*fig.* 90). Comme pour le transformateur Scott, ce résultat est obtenu en associant des vecteurs de grandeurs différentes pris sur les divers enroulements pour avoir les déphasages voulus. Le vecteur vertical, qui correspond à une phase du système diphasé, est la somme vectorielle de deux vecteurs pris respectivement sur les phases *b* et *c*. Le vecteur horizontal, qui correspond à la deuxième phase du système diphasé, est la somme vectorielle de trois vecteurs pris respectivement sur les phases *a*, *b* et *c*. La figure indique le nombre de spires de chaque enroulement diphasé. Ce montage ne fonctionne bien qu'en régime équilibré.

On remarque que le montage Leblanc nécessite plus de cuivre et moins de fer que le montage Scott. Ce dernier est de préférence utilisé quand le réseau diphasé a une forte intensité ou une forte tension.

La transformation d'un système triphasé en un système hexaphasé et réciproquement se fait aisément à l'aide d'un transformateur triphasé en réunissant les milieux des enroulements secondaires. Par rapport à ce point, les extrémités d'un même enroulement sont en opposition de phase. On a alors six vecteurs étoilés déphasés de $\pi/3$ les uns par rapport aux autres. Ce montage est fréquemment utilisé pour l'alimentation des redresseurs.

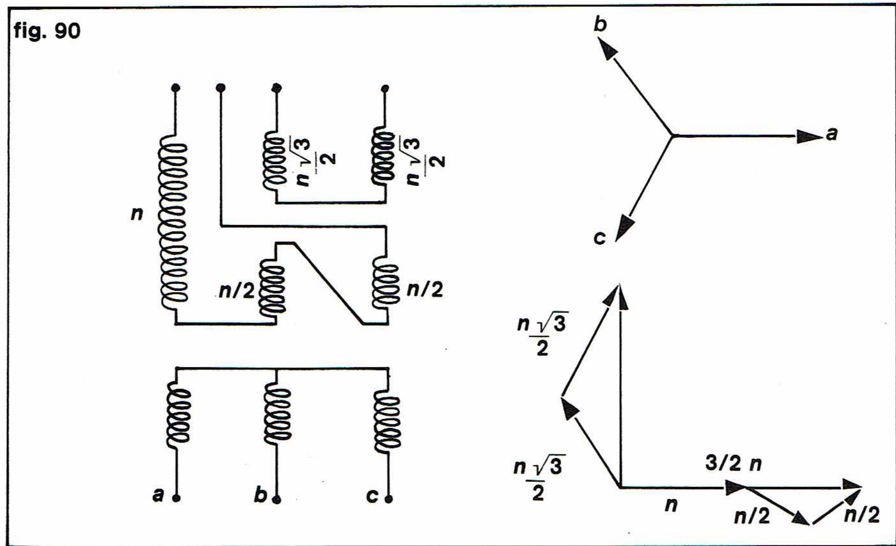
Transformateurs de mesures

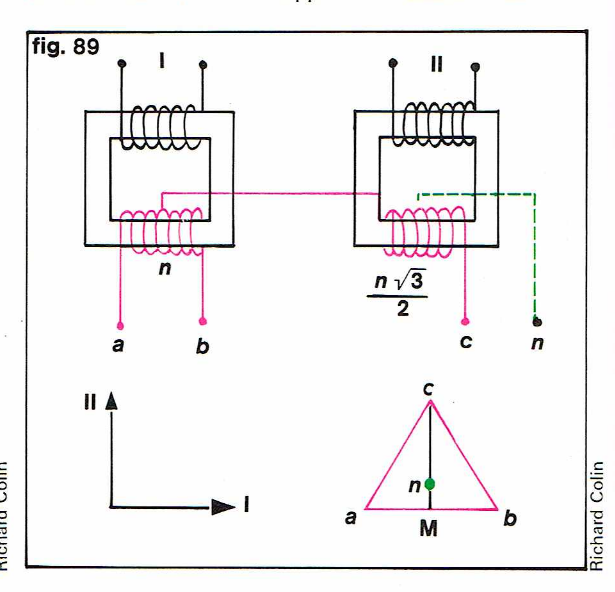
Ils sont utilisés dans les installations à forte intensité et à haute tension pour alimenter les appareils de mesure et de protection en abaissant l'intensité et la tension à des valeurs telles que leur utilisation n'entraîne pas de précautions spéciales pour le personnel et pour la fabrication des appareils. Pour que les mesures soient exactes, il faudrait que le rapport des valeurs efficaces soit égal au rapport du nombre de spires (ou l'inverse) et que les tensions primaires et secondaires, ou les courants, soient en opposition de phase.

Transformateur de tension

Il sert notamment à mesurer une tension alternative élevée, à alimenter un relais de tension ou à alimenter le circuit fil fin d'un wattmètre. Il devrait théoriquement satisfaire aux conditions rappelées ci-dessus relatives au

▼ *A gauche, figure 90 : représentation schématique d'un transformateur de phases de type Leblanc. A droite, figure 89 : représentation schématique d'un transformateur de phases de type Scott.*





rapport de transformation et à l'opposition des phases qui sont les conditions d'un transformateur parfait qui ne peuvent être satisfaites que si les chutes ohmiques primaire et secondaire sont nulles et qu'il n'y ait pas de fuites magnétiques. Les circuits alimentés par le secondaire ont toujours une grande impédance (quelques kΩ à MΩ par volt), et de ce fait les intensités sont très faibles.

L'erreur sur le rapport de transformation ε est fonction de la puissance apparente et du rapport U/U_n :

$$\varepsilon = \frac{mU_1 - U_2}{mU_1} \times 100\,;$$

de même, le déphasage ψ qui mesure l'angle entre U_2 et $- U_1$. Si on fait l'étude sur un cas réel de transformateur qui présente des fuites magnétiques, on arrive à une formule de rapport de transformation de la forme

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2}\,(1 + k)\,;$$

k est un terme correctif, qui, simplifié, est égal à

$$\frac{\mathcal{R}}{R_1} + \frac{R_1\mathcal{R}^2}{2\,n_1^4\omega^2}$$

qui doit être petit, et il le sera d'autant plus que la résistance de l'enroulement primaire sera faible, la réluctance commune faible, la réluctance de fuite primaire élevée.

D'autres formules montrent que le courant primaire I_0 doit rester très faible. On aurait intérêt à faire travailler le circuit magnétique à faible induction, mais, compte tenu de la forte tension primaire, le nombre de spires de cet enroulement serait très élevé $\left(n = \frac{U}{S\omega B}\right)$ ou la section du circuit magnétique trop importante.

La consommation des appareils branchés sur le circuit secondaire ne peut pas toujours être considérée comme négligeable, car il arrive fréquemment de connecter un voltmètre, un phasemètre, un fréquencemètre et quelquefois des enregistreurs. Dans ce cas, le calcul est fait à partir de diagrammes comme pour les transformateurs de puissance en se donnant la puissance apparente et le cos φ du courant secondaire.

Nous avons vu que les erreurs de mesure augmentent avec la puissance apparente; c'est pourquoi on est conduit à fixer une valeur maximale à ne pas dépasser avec un facteur de puissance spécifié pour que les erreurs restent dans certaines limites qui correspondent à la classe du transformateur. Cette valeur maximale est appelée puissance de précision du transformateur. Pour les très hautes tensions, si le transformateur est branché entre phase et terre, le conducteur à haute tension est réuni à la terre à travers une série de condensateurs noyés dans l'huile à l'intérieur d'une borne isolante. Le transformateur est alimenté à partir d'une prise intermédiaire des condensateurs.

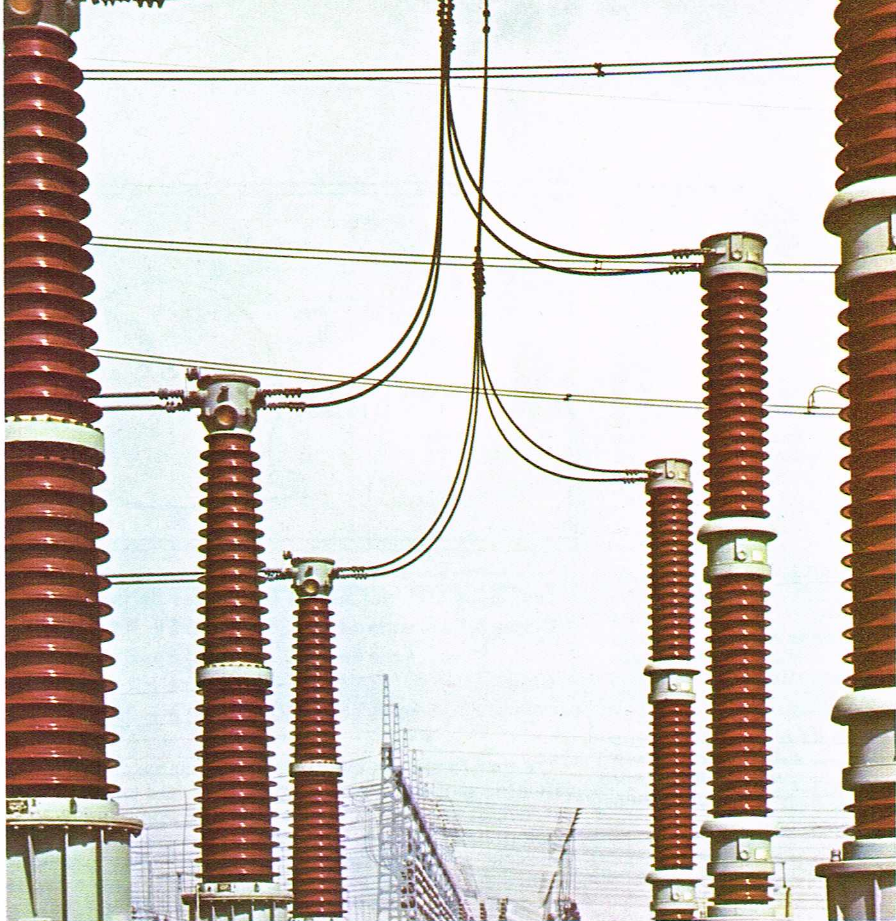
Ils fonctionnent dans les limites de fréquences 15 Hz à 400 Hz. Généralement, la tension secondaire est 100 volts pour les transformateurs monophasés branchés sur les réseaux monophasés ou branchés entre phases de réseaux triphasés. Les puissances de précision les plus courantes sont 15, 30, *50*, 75, *100*, 150, *200* et 300 VA.

Transformateur d'intensité

Le transformateur d'intensité est monté en série dans le circuit pour lequel on désire connaître le module du courant qui circule; il doit donc avoir une faible impédance. Les erreurs relatives au rapport de transformation et à l'opposition des phases doivent être les plus faibles possibles. Dans le cas d'un transformateur réel avec fuites, le rapport des intensités est donné par l'expression simplifiée : $\frac{I_1}{I_2} = \frac{n_2}{n_1}\,(1 + k')$, k' est un terme correctif égal à $\frac{\mathcal{R}/_2}{n_2^2} + \frac{\mathcal{R}^2 R_2^2}{2\,n_2^4\omega^2}$ qui doit être petit, et le déphasage ψ par l'expression simplifiée $\operatorname{tg}\psi = \frac{R_2}{n_2^2\omega\left(\frac{1}{\mathcal{R}} + \frac{1}{R_2}\right)}$. Il est nécessaire d'avoir une valeur de réluctance commune $\mathcal{R}$ très faible qui nécessite l'emploi d'un matériau à forte perméabilité comme le Mumétal et de faible longueur. Le déphasage n'offre pas d'intérêt pour la mesure d'intensité quand le secondaire est fermé sur un ampèremètre; en revanche, il est important pour la mesure d'une puissance où le déphasage doit être aussi petit que possible. Les réluctances doivent être invariables, ce qui exige la fixité des bobines primaire et secondaire l'une par rapport à l'autre et par rapport au circuit magnétique. Ces considérations exigent un soin très particulier des études des forces électrodynamiques qui s'exercent sur chaque bobine de par la circulation de son propre courant et des courants de court-circuit dus aux régimes transitoires.

La puissance de précision est la puissance apparente que le transformateur fournit au secondaire pour laquelle l'erreur du rapport de transformation et le déphasage du courant secondaire par rapport au courant primaire ne dépassent pas les limites correspondant à la classe de précision du transformateur. La puissance de précision doit correspondre à la somme des puissances des appareils à alimenter.

Les transformateurs de classes 0,1 et 0,2 sont utilisés en laboratoire pour des mesures très précises et pour étalonner des transformateurs de moins grande précision. Ceux de classe 0,5 sont destinés aux mesures qui n'exigent pas de précision spéciale. Ceux de classe 1 sont destinés aux mesures industrielles et ceux de classe 2 aux mesures industrielles pour lesquelles le facteur de puissance intervient peu.



Photothèque E.D.F. - Sodel - P. Bérenger

▲ ***Transformateur de mesure 380 kV au poste E. D. F. du Plessis-Gassot; à gauche, transformateurs d'intensité; à droite, transformateurs de tension.***

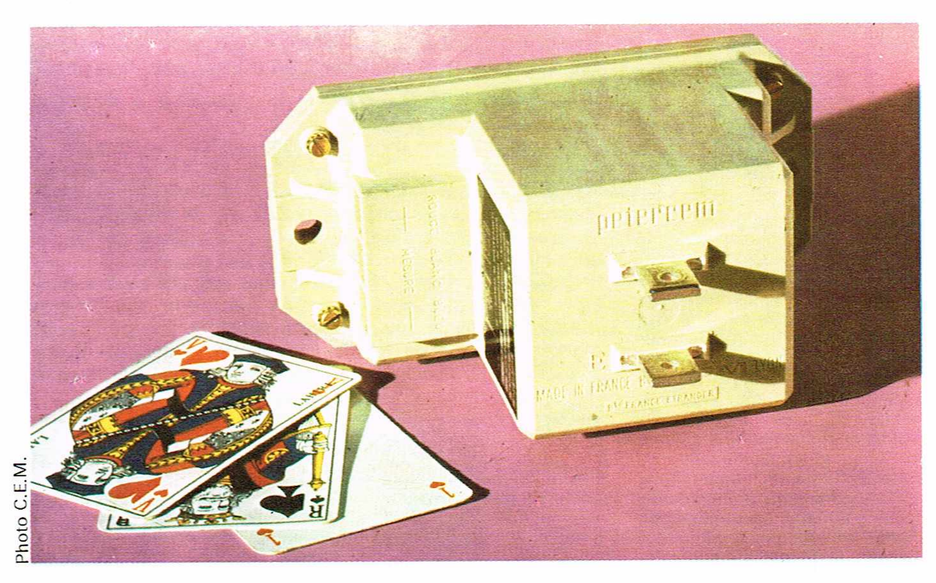
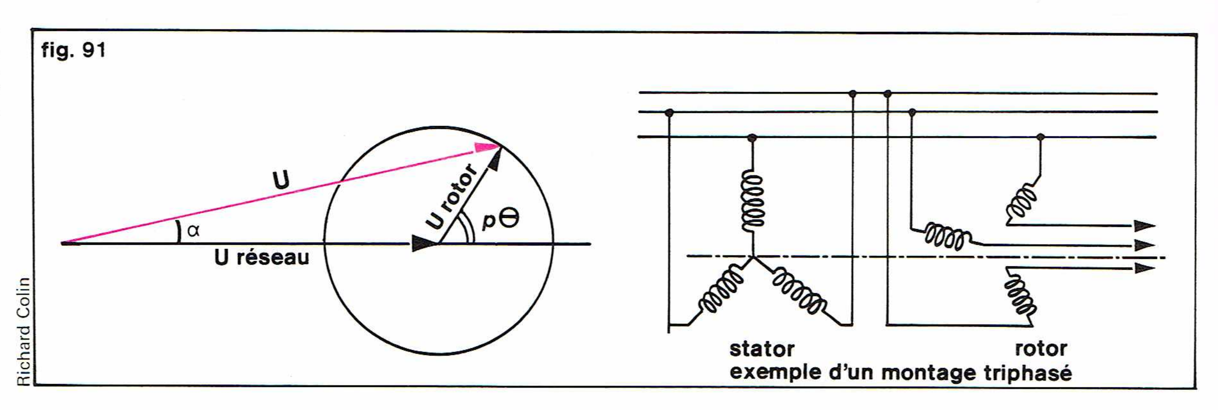


Photo C.E.M.

▼ ***Un transformateur de mesure « Transtonic » de petite taille.***



▶ *Figure 91 : représentation schématique d'un régulateur d'induction : cet appareil est constitué d'un stator (alimenté par le réseau) créant un champ variable et d'un rotor bobiné ; à gauche, diagramme des tensions ; la tension résultante* U *est déphasée d'un angle α.*

▶ *Page ci-contre, figure 95 : courbes de flux dans les deux circuits d'un amplificateur magnétique et courbes de tension. Figure 96 : courbe de la caractéristique* $n_a I_a = f(n_c I_c)$ *pour un amplificateur magnétique.*

Les règles UTE définissent les classes de précision :

Classe 0,1	ε % varie de ± 0,25 (0,1 In)	à ± 0,1 (1,2 In)	
	ψ varie de ± 10′ (0,1 In)	à ± 5′ (1,2 In)	
Classe 1	ε % varie de ± 2 (0,1 In)	à ± 1 (1,2 In)	
	ψ varie de ± 120′ (0,1 In)	à ± 60′ (1,2 In)	

Ce transformateur est abaisseur d'intensité, donc élévateur de tension ; c'est pourquoi il ne faut jamais laisser son circuit secondaire ouvert quand le primaire est sous tension. D'autre part, interrompre le circuit secondaire supprime sa force magnétomotrice ; la force magnétomotrice primaire ne varie pas, car I_1 est imposée par le réseau sur lequel est branché le transformateur. L'induction augmente sensiblement, les pertes fer échauffent le circuit dangereusement.

Il existe différentes formes de construction en fonction des tensions et des intensités : pour les tensions élevées et les intensités faibles, l'ensemble primaire-secondaire est placé à l'intérieur d'un isolateur. Quand les tensions sont faibles, les primaires et secondaires sont séparées comme dans un transformateur ordinaire.

Régulateurs d'induction

Un régulateur d'induction est un transformateur qui permet de régler progressivement le rapport de transformation. La présentation matérielle est différente d'un transformateur classique, car il est constitué comme un moteur asynchrone à l'arrêt. Bien que tous les organes soient fixes, il se compose d'un stator alimenté par le réseau qui crée un champ variable à l'intérieur duquel est logé un rotor bobiné bloqué. Les enroulements de ce dernier, placés dans ce champ variable, sont parcourus par des courants suivant des lois identiques à celles utilisées pour les transformateurs. Ce rotor, soumis à un couple, est bloqué mais on peut le faire tourner à volonté pour décaler les axes de ses phases par rapport aux axes des phases correspondantes du stator. On obtient alors un déphaseur à rapport de transformation constant $m = \frac{k_2 n_2}{k_1 n_1}$.

Si, maintenant, on branche les extrémités des enroulements du rotor au réseau (il faut évidemment que le nombre de phases soit identique), on obtient pour une phase $\vec{U} = \vec{U}_{réseau} + \vec{U}_{rotor} < p\theta$, si le régulateur a p paires de pôles (*fig.* 91).

La tension varie de façon continue en fonction de la rotation du rotor entre les valeurs extrêmes $U_{réseau} - U_{rotor}$ et $U_{réseau} + U_{rotor}$. Hormis ces deux valeurs pour lesquelles U est en phase avec $U_{réseau}$, la tension résultante est déphasée d'un angle α. Pour supprimer cet angle, qui peut être un inconvénient dans certains cas, on utilise un double régulateur : les rotors sont montés sur le même arbre, les stators sont branchés pour que leur champ tourne en sens inverse. Les enroulements des rotors sont montés en série de telle manière que le déphasage en avance de l'un soit compensé par le même déphasage arrière de l'autre (*fig.* 92). Il s'ensuit que la tension résultante est toujours en phase avec $U_{réseau}$ et que les deux couples qui s'exercent sur les rotors s'annulent.

La puissance du régulateur est plus faible que la puissance à régler, mais le (ou les) rotor(s) est (ou sont) parcouru(s) par l'intensité totale utilisée. La construction est spéciale, car elle comporte plus de cuivre qu'une machine tournante de même puissance. Généralement, la tension régulée est faible. Au point de vue du calcul, il faut prendre en compte une réactance plus importante qu'un transformateur ordinaire.

Il présente l'avantage d'une variation absolument continue de la tension, et de l'absence de contacts pouvant être détériorés par un arc. En effet, la rotation limitée à $\pm \frac{\pi}{2}$ par rapport à la valeur moyenne $p\theta = \frac{\pi}{2}$ permet de supprimer les bagues et de les remplacer par des liaisons souples.

fig. 92

U

U réseau — U rotor — pΘ — U rotor — pΘ

Richard Colin

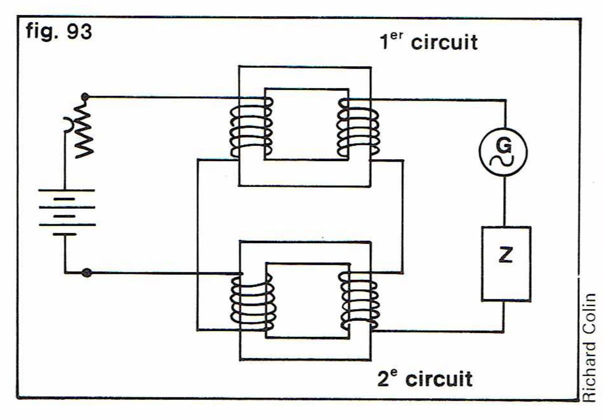
▶ *Figure 92 : diagramme des différentes tensions dans le cas d'un double régulateur d'induction : ce montage permet la suppression de l'angle α. Figure 93 : représentation schématique d'un transducteur, amplificateur magnétique comprenant 2 circuits identiques connectés de manière que les f. é. m. induites s'annulent.*

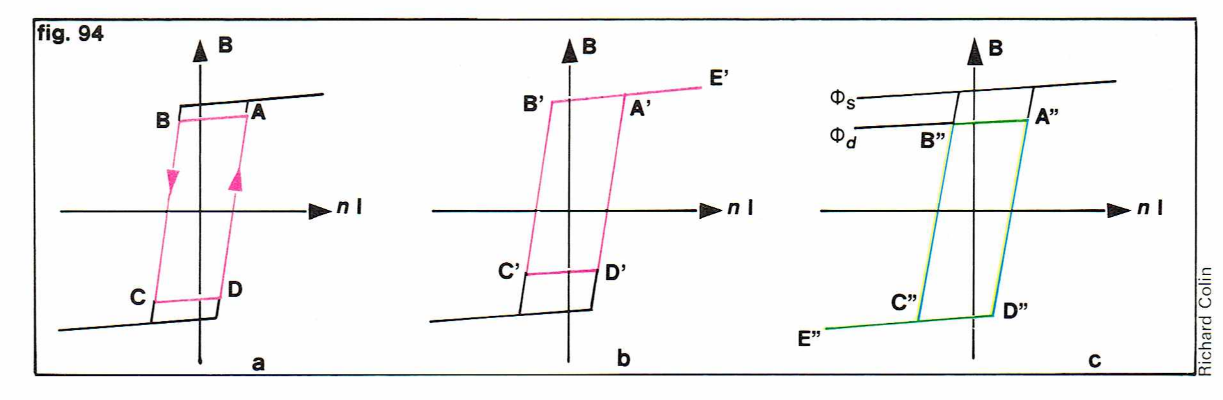
Amplificateurs magnétiques

Le principe est celui de la réactance saturable : la réactance offerte à un courant alternatif par une bobine à noyau de fer peut varier dans de larges proportions quand les ampères-tours produits par un courant continu saturent plus ou moins le circuit magnétique. La commande est donc en principe réalisée avec un courant continu. C'est un appareil qui permet de réaliser de grandes variations de puissance dans un récepteur Z par les variations d'un faible courant continu.

Sous la forme simplifiée décrite ci-dessus, le courant alternatif induirait dans l'enroulement de commande à courant continu une force électromotrice alternative. Pour supprimer cet inconvénient, on utilise un montage symétrique comprenant deux circuits identiques connectés de manière que les forces électromotrices induites s'annulent. L'ensemble obtenu s'appelle *transducteur* (*fig.* 93).

Adoptons certaines hypothèses simplificatrices, notamment que le cycle dynamique du matériau est constitué de segments linéaires. Quand le circuit n'est pas saturé, l'impédance d'un enroulement parcouru par un courant alternatif est très élevée, par contre elle est faible quand le circuit est saturé. Les résistances des enroulements du circuit de commande sont faibles. Quand le courant de commande est nul, le point représentatif de l'état magnétique du circuit parcourt le cycle d'hystérésis ABCD (*fig.* 94). A l'apparition des ampères-tours de commande,





◀ *Figure 94; parcours du point représentatif de l'état magnétique du circuit d'un amplificateur magnétique :*
a, quand le courant de commande est nul;
b, à l'apparition des ampères-tours de commande (pour le premier circuit);
c, à l'apparition des ampères-tours de commande (pour le deuxième circuit).

le point représentatif de l'état magnétique se déplace suivant la courbe A′B′C′D′E′ pour le premier circuit et A″B″C″D″E″ pour le second circuit. La courbe du flux dans chaque circuit permet de déduire la variation de la tension aux bornes de l'utilisation (*fig.* 95). Quand les variations de flux peuvent se produire, la relation qui lie $n_a I_a$ à $n_c I_c$ est $n_a I_a = n_c I_c$. Sinon l'égalité n'est plus valable. La caractéristique $n_a I_a = f\ (n_c I_c)$ est représentée par la *figure* 96.

Pour obtenir les meilleures performances, il est souhaitable d'avoir de très faibles pertes par hystérésis, avec un cycle très étroit, de très faibles pertes par courants de Foucault, avec une résistivité élevée et des matériaux de faible épaisseur, une induction de saturation élevée, des coudes du cycle d'hystérésis très brusques, des caractéristiques stables.

Ils présentent certains avantages : le gain en puissance peut être élevé : 25 avec les montages décrits, 10^6 avec les montages avec réaction; leur usure est nulle, très peu d'entretien, les circuits d'entrée et de sortie sont isolés électriquement, les puissances de sortie peuvent être importantes. Pour les faibles puissances, l'emploi des circuits magnétiques toriques est conseillé par ses fuites magnétiques très faibles. Pour les fortes puissances, les circuits à colonnes sont préférés à cause des difficultés d'isolement pour un volume donné des circuits toriques.

Convertisseurs

Un convertisseur est un appareil destiné à transformer un système électrique de caractéristiques données en un autre système électrique de caractéristiques différentes. On peut convertir

— un courant alternatif en courant continu et réciproquement,

— un courant alternatif d'une certaine fréquence en courants alternatifs de fréquences différentes,

— un système de courant alternatif en un système de même fréquence ayant un nombre de phases différent.

Cette conversion s'effectue au moyen de machines électromagnétiques ou à semi-conducteurs.

La transformation du courant alternatif en courant continu par semi-conducteurs fait l'objet du chapitre *Redresseurs*. Le changement de phases à l'aide de transformateurs est explicité dans le chapitre *Transformateurs*.

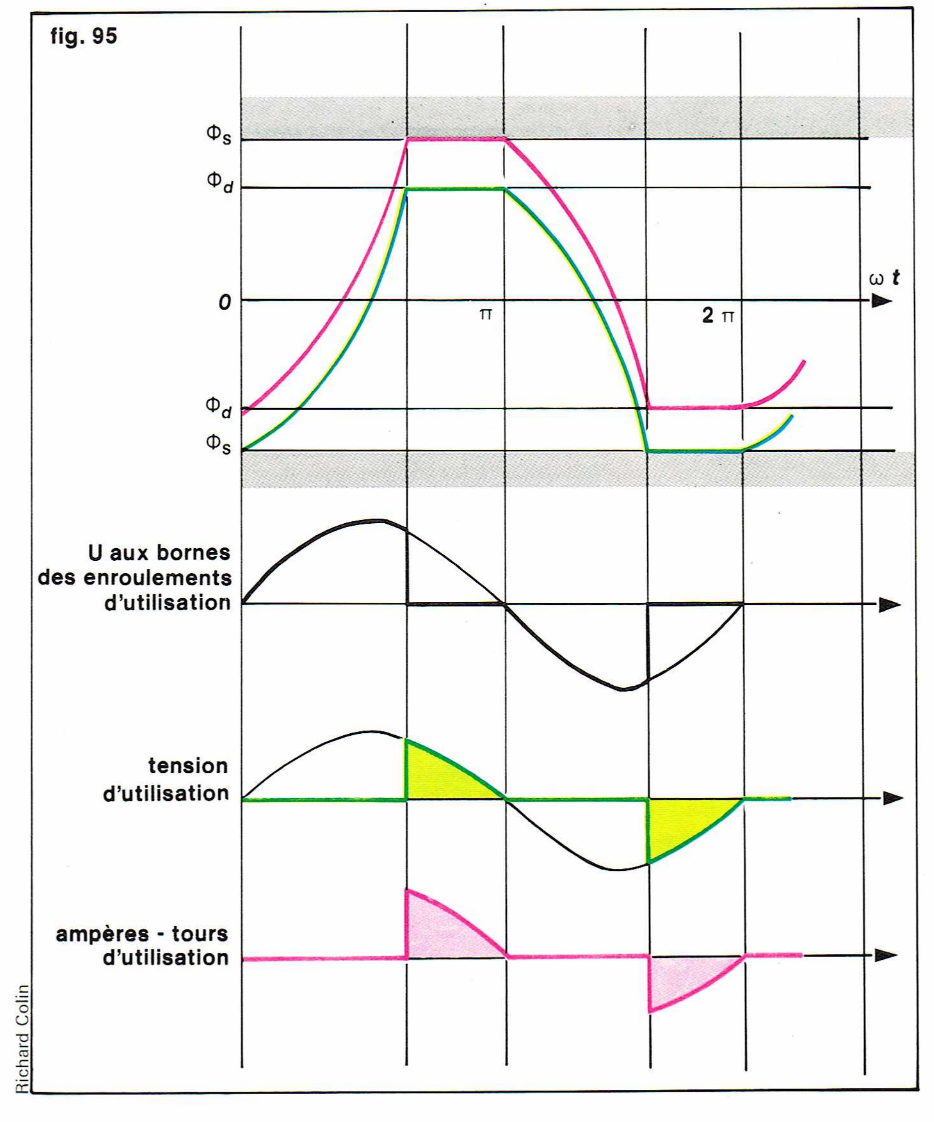
La conversion continu-alternatif apporte une solution aux problèmes de la continuité d'alimentation en alternatif par le stockage préalable qu'il est possible d'avoir en continu (et non en alternatif) par des batteries d'accumulateurs.

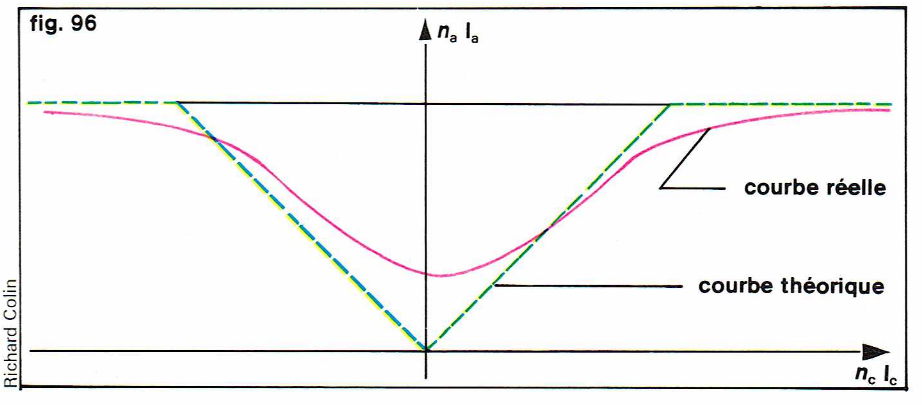
Convertisseurs électromagnétiques continu-alternatif et réciproquement

Il existe deux types principaux de machines : les groupes convertisseurs et les commutatrices.

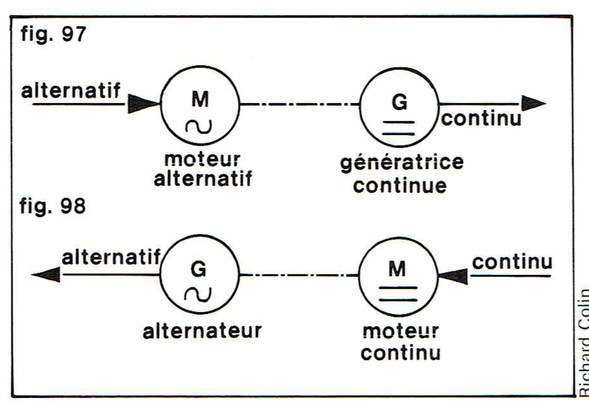
Groupe convertisseur

Un groupe convertisseur est un ensemble de deux machines accouplées mécaniquement, l'une à courant alternatif, l'autre à courant continu. Si on transforme un courant alternatif en courant continu, la machine alternative fonctionne en moteur qui entraîne la génératrice à courant continu (*fig.* 97). Le moteur est généralement une machine asynchrone dont la vitesse varie peu en fonction de la charge, car le glissement n'excède pas





▶ *Figures 97 et 98 : représentation schématique de deux types de convertisseurs ; fig. 97 : convertisseur transformant du courant alternatif en courant continu ; fig. 98 : convertisseur transformant du courant continu en courant alternatif.*



quelques pour cent. Cette constance de vitesse est souhaitable ; en effet, la tension de la génératrice varie avec sa vitesse de rotation suivant la loi

$$U = kn\mathrm{N}\Phi - \mathrm{RI} - h' - \Delta u_{\text{balais}}.$$

Si le flux inducteur Φ et la charge sont constants, la relation devient $U = k'n - h$ qui montre que cette tension est proportionnelle à la vitesse n. La génératrice est choisie en fonction de l'utilisation suivant les allures des caractéristiques en charge que nous offrent les différents modes d'excitation : séparée, en dérivation, en série, composée.

Dans le fonctionnement inverse (*fig.* 98), la génératrice devient moteur d'entraînement du groupe, et le moteur devient générateur alternatif. Dans ce cas particulier, l'emploi d'un générateur asynchrone est très exceptionnel, l'utilisation courante est le générateur synchrone ou alternateur, qui, contrairement au précédent, peut alimenter seul, sans artifice, un réseau de distribution en fournissant les puissances actives et réactives nécessaires aux utilisateurs. La fréquence est fonction de la vitesse du groupe $f = \frac{pn}{60}$; de ce fait, s'il est nécessaire qu'elle soit constante, il faut un moteur à courant continu suffisamment puissant pour que le point de fonctionnement reste dans la partie pratiquement horizontale et linéaire de sa caractéristique en charge. L'emploi d'un moteur de plus faible puissance nécessite une régulation de vitesse. Un tel groupe ne nécessite pas une étude spéciale ; il suffit de se reporter séparément aux machines correspondantes.

fig. 99

E_{tri}

E_c

Richard Colin

▲ *Figure 99 : voir développement dans le texte.*

Commutatrice

C'est une seule et même machine qui permet d'obtenir les mêmes résultats que le groupe convertisseur, avec toutefois quelques restrictions. Elle se compose d'un stator et d'un rotor. Le rotor comporte un bobinage fermé identique à celui des machines à courant continu. D'un côté, les enroulements sont reliés à un collecteur ; de l'autre côté, ils sont reliés à des bagues dont le nombre varie suivant le nombre de phases du réseau alternatif (*fig.* 99).

Ce rotor est placé dans un stator de machine à courant continu. L'inducteur fixe, alimenté en courant continu, produit un champ constant en direction. Si l'induit est alimenté par une source continue, ses enroulements parcourus par un courant et placés dans un champ se déplacent perpendiculairement à celui-ci : c'est un moteur à courant continu. Côté bagues, on recueille une tension alternative dont la fréquence dépend de la vitesse de rotation. Inversement, si l'induit est alimenté par une tension alternative, du côté des bagues, c'est un moteur synchrone.

Entraînée par un moteur extérieur, elle peut débiter simultanément ou indépendamment par les bagues des courants polyphasés et par le collecteur un courant continu. Le fonctionnement dans le sens moteur continu-alternateur est assez exceptionnel et est appelé *commutatrice inversée*.

Quel que soit le nombre de phases, les enroulements ne peuvent être connectés en étoile, car le bobinage doit être obligatoirement fermé pour permettre le fonctionnement en courant continu. Dans le fonctionnement moteur continu-alternateur, la fréquence dépend de la vitesse et peut être réglée à volonté ; si l'on désire une fréquence constante, il faut prévoir une régulation de vitesse. Dans le fonctionnement moteur synchrone-dynamo, la vitesse est obligatoirement constante, car elle est imposée par le réseau. La présence d'un seul enroulement rotorique confère à la commutatrice un rapport constant entre les tensions continue et alternative. En effet, en monophasé, les forces électromotrices maximales sont identiques, soit $E_{\text{continu}} = E_{\text{maxi}}$ alternative, et en valeur efficace

$$E_{\text{eff}}/E_c = 1/\sqrt{2}.$$

Le rapport est dans ce cas $1/\sqrt{2}$. En triphasé,

$$E_{\text{max tri}}/E_c = \sqrt{3}/2$$

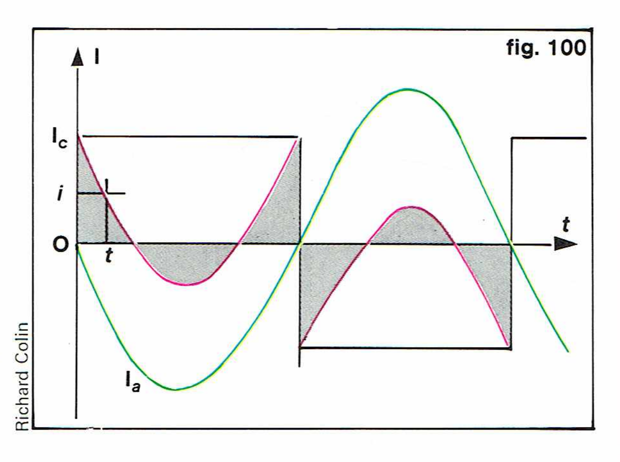
et en valeur efficace $E_{3\text{eff}}/E_c = \sqrt{3}/2\sqrt{2}$. Le rapport est dans ce cas $\sqrt{3}/2\sqrt{2}$. Pour toute autre tension polyphasée, on obtient ce rapport aisément par simple calcul. Il est toutefois plus aisé de prendre la loi générale

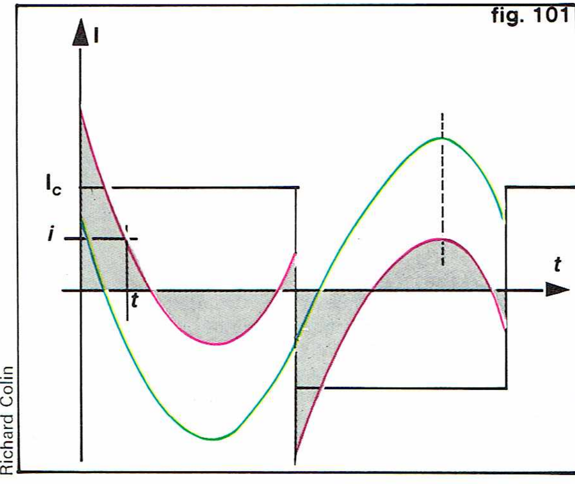
$$U_{\text{alternatif}}/U_{\text{continu}} = 1/\sqrt{2} \times \sin \pi/q$$

q est le nombre de phases. En réalité, ce rapport varie légèrement en fonction de la charge à cause des chutes de tension internes. L'enroulement de l'induit est traversé simultanément par les intensités continue et alternative qui sont opposées en vertu de la loi de Lenz. Le courant instantané dans une spire est égal à la somme algébrique des courants alternatif et continu. Dans le cas d'une spire par phase avec un facteur de puissance égal à l'unité, les intensités changent de signe au même moment (*fig.* 100). A l'instant t, le courant résultant est égal à $i = I_c - I_a \sin \omega t$. La valeur efficace de l'intensité résultante est généralement plus faible que les intensités continue et alternative qui traverseraient séparément la spire. Il en est tout autrement s'il y a déphasage entre les deux intensités, car, pendant un temps t', variable avec le déphasage φ, les deux intensités s'ajoutent et la valeur résultante devient rapidement plus élevée que les intensités continue et alternative prises séparément (*fig.* 101). A l'instant t, le courant résultant est égal à

$$i = I_c - I_a \sin(\omega t \pm \varphi).$$

Ces résultats montrent qu'une commutatrice doit fonctionner avec un facteur de puissance voisin de l'unité. En réalité, une phase comprend plusieurs spires. Si le brin médian est parcouru par des intensités en opposition de





▶ *Figures 100 et 101 : courbes des intensités continue I_c, alternative I_a et résultante i en fonction du temps t ; fig. 100 : dans le cas d'une spire par phase et d'un facteur de puissance égal à l'unité, les intensités changent de signe au même moment ; fig. 101 : dans le cas du déphasage entre I_c et I_a.*

phase, les brins extrêmes d'une phase sont parcourus par des intensités alternative et continue déphasées qui engendrent des pertes Joule plus importantes que celles émanant de la spire médiane. Les pertes Joule d'une commutatrice sont d'autant plus faibles que le nombre de phases est élevé.

Appelons W l'énergie perdue par effet Joule dans une spire placée suivant un angle θ par rapport à la spire médiane. Cette énergie varie suivant la position des spires. Sa valeur moyenne pour l'ensemble des spires comprises entre les brins extérieurs est égale à

$$W_{moy} = \frac{q}{2\pi} \int_{-\pi/q}^{+\pi/q} W d\theta$$

et permet d'établir le rapport, suivant le facteur de puissance, entre les pertes Joule d'une commutatrice et les pertes Joule d'une génératrice à courant continu.

Nombre de bagues	Rapport à $\cos\varphi = 1$	Rapport à $\cos\varphi = 0{,}8$
2	1,39	2,51
3	0,56	1,23
4	0,38	0,90
6	0,27	0,77
∞	0,19	—

A $\cos\varphi = 1$, le rendement de la commutatrice polyphasée est supérieur à celui de la dynamo à puissance égale. Dans le fonctionnement moteur alternatif-générateur continu, les variations de tension continue sont difficiles à faire à cause du rapport de transformation qui est constant et de la tension alternative qui est souvent constante. Pour obtenir cette variation de tension continue, les procédés de réglage peuvent agir soit sur la tension alternative, soit sur la tension continue.

Côté alternatif, nous pouvons mentionner trois solutions : le transformateur à prises, la bobine d'inductance, le régulateur d'induction. La première solution permet une variation importante, mais discontinue. La seconde permet une variation faible, mais continue, et ne nécessite pas d'appareils compliqués.

En faisant varier l'intensité d'excitation du moteur synchrone, on fait varier le déphasage entre la tension à ses bornes et le courant d'alimentation (*fig.* 102).

Étant donné que la tension aux bornes de l'inductance U_L, en négligeant la résistance, est perpendiculaire à l'intensité qui la traverse, la tension aux bornes de la commutatrice U_{com}, qui est la somme vectorielle

$$\overrightarrow{U_{com}} = \overrightarrow{U_R} + \overrightarrow{U_L},$$

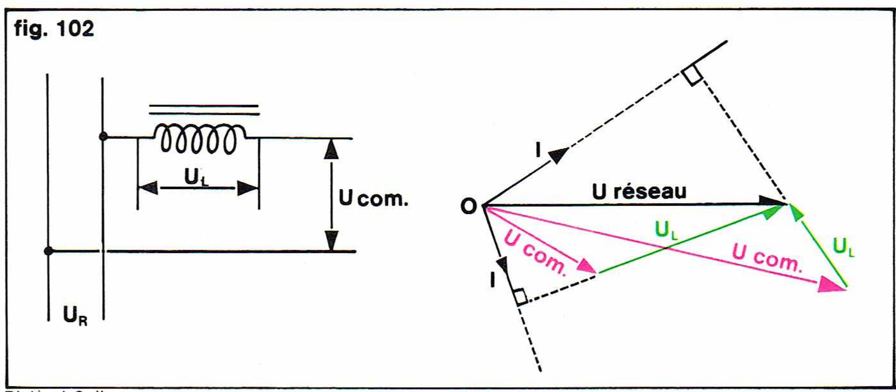
varie de façon continue. Ce réglage est réalisé par l'intermédiaire du déphasage; or, le rendement diminue quand on s'éloigne de l'unité pour le facteur de puissance. Pratiquement, les variations de tension ne doivent pas dépasser $\pm$ 5 %. La troisième permet une variation un peu plus importante et continue de $\pm$ 5 % à $\pm$ 15 %. Le régulateur d'induction (voir chapitre *Transformateurs*) est intercalé entre le réseau et la commutatrice. La rotation de son rotor fait varier la tension alternative. Côté continu, on peut monter un survolteur-dévolteur dont le réglage de l'excitation permet de faire varier la tension dans les limites $U_{continu} - U_{survolteur\text{-}dévolteur}$ à $U_{continu} + U_{survolteur\text{-}dévolteur}$.

Ces solutions sont onéreuses par leur construction et leur entretien; c'est pourquoi, sauf pour des applications spéciales ou pour de grandes puissances, on préfère les convertisseurs statiques.

Convertisseurs statiques

Les convertisseurs sont des appareils utilisés pour la conversion électronique de l'énergie et constitués de semi-conducteurs, transformateurs, filtres et éventuellement d'auxiliaires. Ils sont autocommutés quand leur sont incluses les tensions de communication.

Les onduleurs sont utilisés pour la conversion de courant continu en courant alternatif. Ceux qui comprennent un redresseur et un onduleur avec une liaison en courant continu s'appellent des convertisseurs indirects à courant alternatif. Les convertisseurs indirects à courant continu comprennent un onduleur et un redresseur avec une liaison en courant alternatif.



Richard Colin

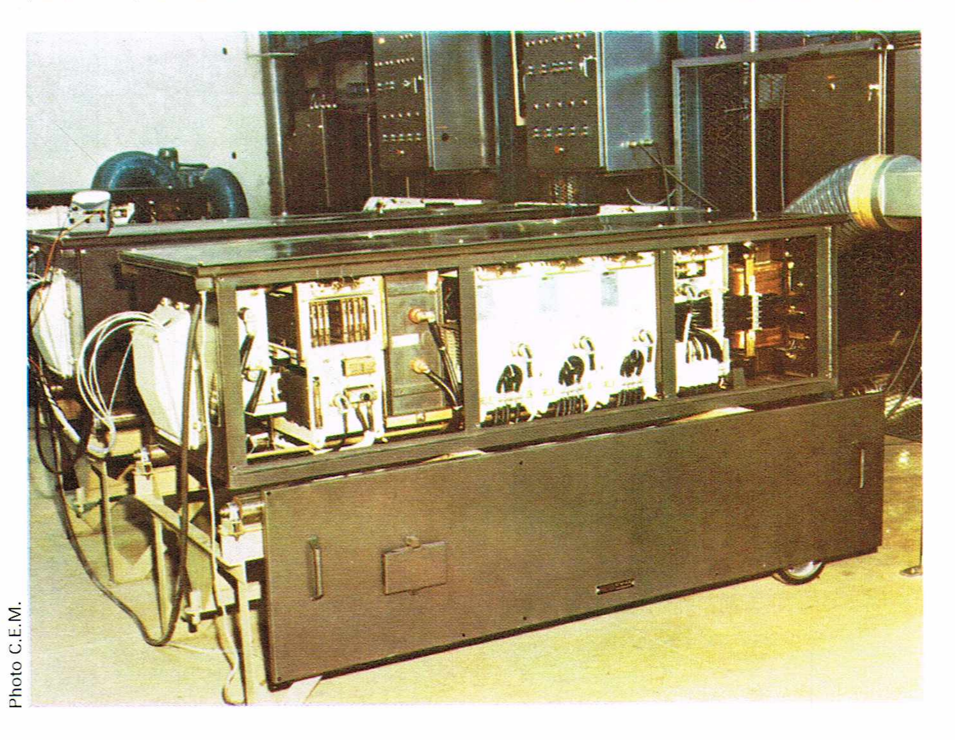
▲ ***Figure 102 : montage permettant la variation de tension continue dans une commutatrice (voir développement dans le texte).***

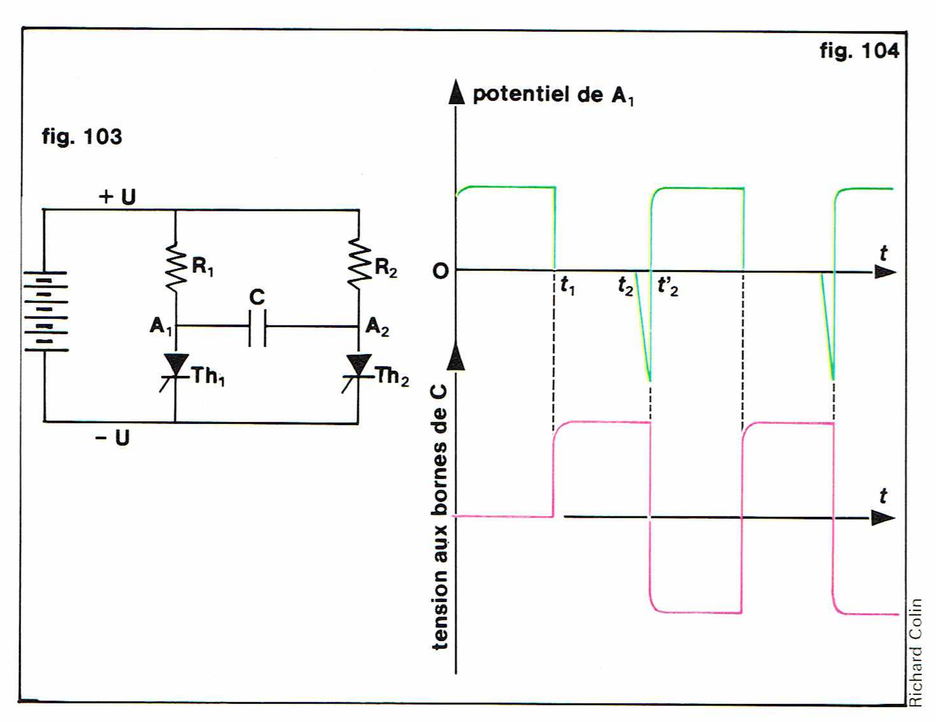
Abordons en premier lieu les onduleurs. Il existe deux types d'onduleurs : l'onduleur assisté, ou onduleur non autonome, et l'onduleur autonome. Le premier alimente un réseau alternatif, et sa commande est assurée par le secteur. Le second est surtout utilisé pour alimenter un réseau qui ne comporte pas de source de courant, et sa commande lui est propre.

Onduleurs monophasés

Le principe est le suivant : avec deux redresseurs contrôlés, dont les plus couramment employés sont les *thyristors*, il s'agit de faire circuler dans la charge, alternativement dans un sens puis dans l'autre, le courant continu issu de la batterie d'alimentation. Le montage est toujours symétrique. L'utilisation des deux chemins est contrôlée par les thyristors successivement conducteurs et non conducteurs. Un thyristor est un assemblage à semi-conducteurs monocristallin à conductibilité unidirectionnelle. Il est bistable dans le sens direct et comporte trois jonctions PN et une électrode de commande appelée gâchette; quand on applique un signal électrique à la gâchette, il passe de l'état non conducteur à l'état conducteur. Considérons le montage de la *figure* 103. Il comporte une batterie d'alimentation, deux résistances de charge R_1 et R_2, deux thyristors Th_1 et Th_2 et une capacité C. Au repos, les deux thyristors sont non conducteurs et les points A_1 et A_2 sont au potentiel + U; la capacité n'est pas chargée. Rendons conducteur Th_1 à l'instant t_1 en appliquant un signal électrique à sa gâchette : le potentiel de A_1 tombe à 0 et entraîne le point A_2 au potentiel 0 par l'intermédiaire de C (*fig.* 104). La capacité va se charger à travers les résistances R_1 et nous aurons le potentiel + U sur ses armatures de droite et — U sur

▼ ***Deux groupes de convertisseurs statiques S. T. C. O. utilisés dans les voitures de voyageurs du réseau S. N. C. F. et des réseaux européens. Ils peuvent être alimentés par 4 tensions différentes : 1 500 V ou 3 000 V continu, 25 000 V-50 Hz ou 16 2/3 Hz.***


Photo C.E.M.



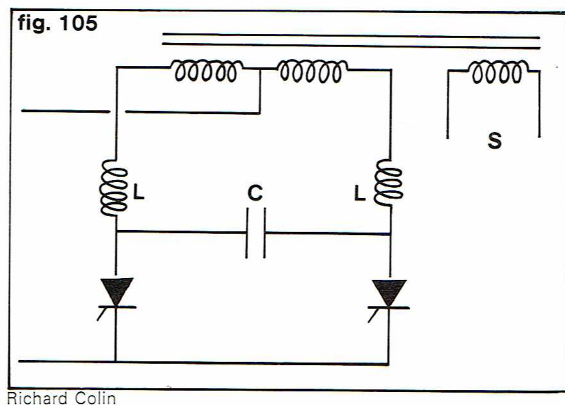


fig. 106

Richard Colin

▲ *Figure 103 : principe de l'onduleur monophasé.*
Figure 104 : courbes des potentiels et tensions d'un onduleur monophasé.

▶ *Figure 105 : autre type d'onduleur monophasé ; les deux résistances sont remplacées par un enroulement de transformateur.*
Figure 106 : courbe de tensions correspondant au montage de la figure 105.

▼ *Tiroir électronique pour la commande de convertisseurs de fréquence bi- et quadricourant réalisé par la C. E. M. pour la S. N. C. F.*

ses armatures de gauche. Rendons conducteur Th_2 à l'instant t_2 en appliquant un signal électrique à sa gâchette : le potentiel de A_2 tombe à 0 et, simultanément, le potentiel de A_1 passe à — U, car il y a eu translation de la valeur U vers les négatifs du potentiel des armatures. Si cette tension négative, appliquée à A_1, est supérieure au temps de désionisation ou de turn-off, le thyristor Th_1 devient non conducteur, le potentiel de A_1 redevient + U. Si le cycle des amorçages de Th_1 et Th_2 continue, nous recueillons aux bornes de C une tension alternative. Si la constante de temps RC est faible par rapport aux intervalles 0, t_1, t_2, etc., la tension aux bornes C est pratiquement rectangulaire. Quand l'onde alternative a la forme de créneaux, l'appareil est un mutateur. Par contre, si cette constante de temps est longue, le temps $t'_2 - t_2$ augmente et le potentiel maximal de A_1 peut ne pas atteindre + U et la tension aux bornes de C est triangulaire.

Pour avoir une utilisation pratique, on remplace (*fig.* 105) les deux résistances par un enroulement de transformateur à point milieu auquel on applique le potentiel + U. L'inversion de sens de charge du condensateur à travers les enroulements engendre une onde oscillatoire amortie par la présence de L et C. Il faut calculer la fréquence d'accord en fonction de la fréquence que l'on désire dans la charge d'utilisation. Si l'on amorce le second thyristor après une demi-période d'oscillation du circuit LC, on recueille aux bornes de l'enroulement secondaire du transformateur une tension sinusoïdale à la fréquence désirée. Si le circuit est correctement calculé, il est possible d'obtenir sans filtrage moins de 10 % de distorsion.

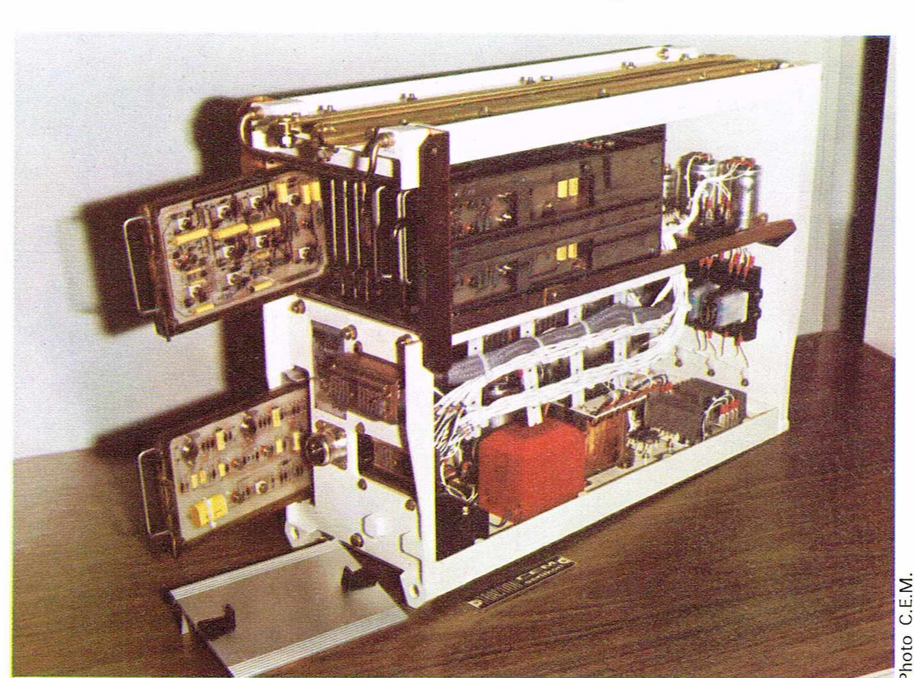


Photo C.E.M.

Onduleurs triphasés

On peut obtenir un système triphasé en associant trois onduleurs monophasés dont les tensions de sortie sont déphasées de $2\pi/3$ les unes par rapport aux autres. Le générateur d'impulsion est conçu pour conserver ce décalage et régler les onduleurs indépendamment les uns des autres quand la charge est déséquilibrée (*fig.* 106).

La stabilité de la fréquence est fonction de la qualité de la base de temps du générateur d'impulsions de commande des thyristors. Le rendement de la conversion continu-alternatif atteint 85 à 90 %. Ils sont couramment utilisés comme source de secours dans les installations où la continuité d'alimentation doit impérativement être assurée pour des raisons de sécurité.

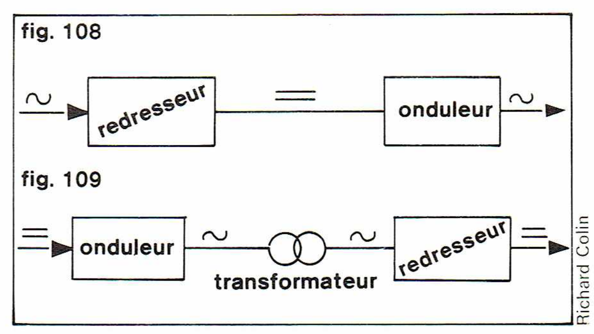
Il est quelquefois économique d'assurer le transport d'énergie en courant continu. C'est cette solution qui a été retenue entre la France et la Grande-Bretagne. Quand la France assure une fourniture à l'Angleterre, l'appareillage côté français fonctionne en redresseur, celui du côté anglais en onduleur, et réciproquement (*fig.* 107).

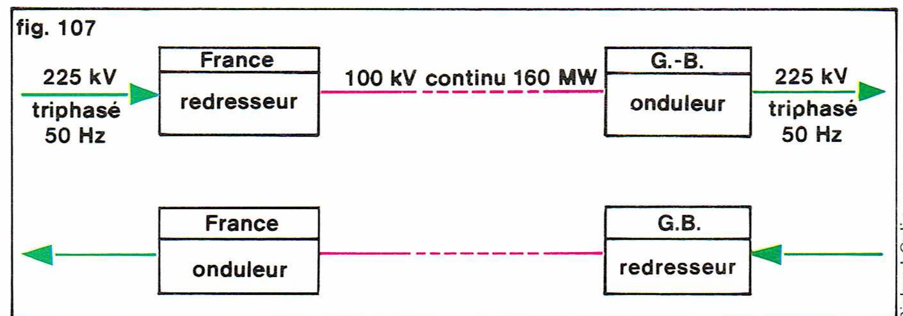
* *Convertisseurs alternatif-alternatif*

Ils permettent un changement de fréquence avec ou sans changement de tension. Ils se composent d'un redresseur suivi d'un onduleur (*fig.* 108).

* *Convertisseurs continu-continu*

Ils permettent un changement de tension, très souvent dans le sens élévateur de tension. Ils se composent d'un onduleur, d'un transformateur et d'un redresseur (*fig.* 109).





Redresseurs

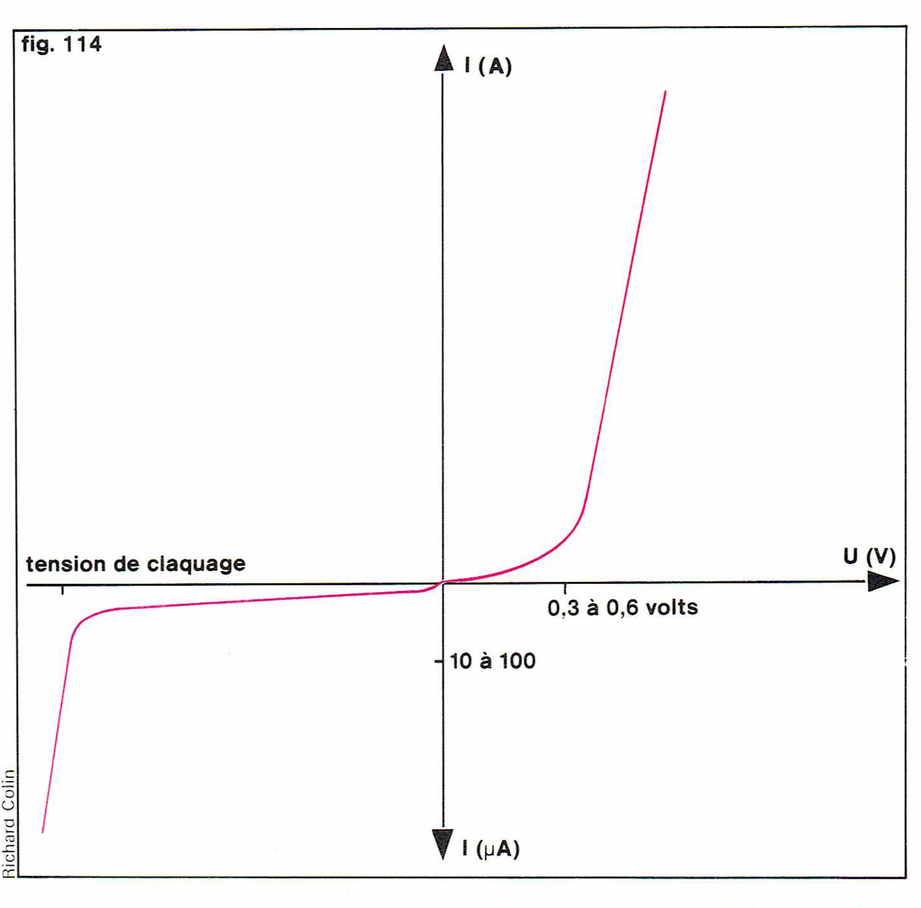
Les redresseurs assurent la conversion alternatif-continu. Les tensions et courants continus sont très utilisés pour l'alimentation des moteurs à courant continu qui présentent des avantages relatifs aux réglages des vitesses et couples, pour effectuer des électrolyses, pour charger les batteries d'accumulateur. On peut utiliser des machines tournantes : convertisseurs à plusieurs machines, commutatrices (voir le chapitre *Convertisseurs*), ou des montages à semi-conducteurs à conductibilité unidirectionnelle : diodes ou thyristors.

Principe d'un semi-conducteur à conductibilité unidirectionnelle

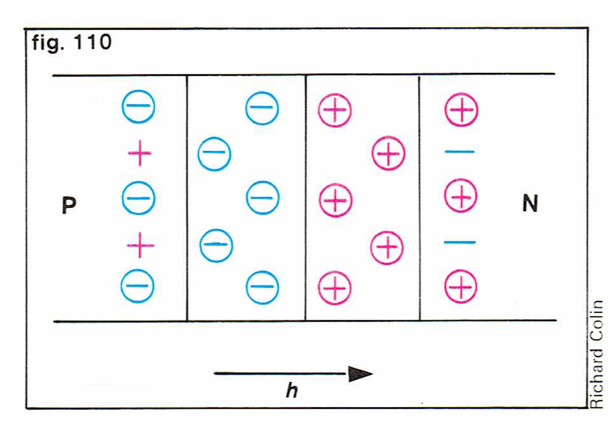
Une diode de ce type est formée par la jonction de semi-conducteurs dopés N et P. Un semi-conducteur est dopé quand il contient des impuretés qui donnent ou qui acceptent des électrons libres ; quand il y a excès d'électrons, il est de type N. Inversement il est de type P quand il y a excès de « trous ». A la jonction, dans la zone de contact, il y a déplacement des charges négatives de la région N vers la région P. Ce passage se fait par diffusion et tend à uniformiser la densité des charges dans tout le métal. Ces charges spatiales négatives et positives font apparaître un champ électrique interne $\vec{h}$ de sens tel qu'il s'oppose à la diffusion des trous vers N et des électrons vers P : c'est une barrière de potentiel (*fig.* 110).

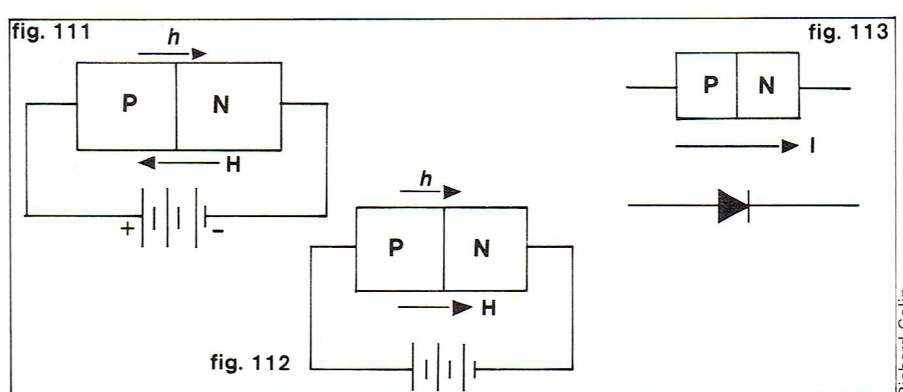
Si on applique aux bornes de cette jonction une différence de potentiel, elle produit un champ électrique $\vec{H}$. Si le potentiel positif est branché côté P et le potentiel négatif côté N, le champ $\vec{H}$ s'oppose à $\vec{h}$ et favorise la tendance à la conduction, les électrons se propagent dans le sens de $\vec{H}$ et la jonction conduit (*fig.* 111). En revanche, si on inverse les branchements, le champ $\vec{H}$ renforce le champ $\vec{h}$, ce qui a pour but d'augmenter l'épaisseur de la barrière de potentiel, et la jonction ne conduit pas (*fig.* 112). La correspondance entre la réalité physique et la représentation symbolique est donnée par la *figure* 113.

En réalité, dans le sens direct, il faut une certaine tension pour que le passage se fasse et, dans le sens inverse, il existe toujours un léger courant. La *figure* 114 donne la caractéristique courant-tension d'une diode au silicium. Si on applique une tension inverse trop élevée, appelée *tension de claquage*, on détruit la diode en supprimant sa propriété de semi-conducteur par phénomène d'avalanche. Sa résistance passe alors d'une valeur de quelques dizaines ou centaines de mégohms à une valeur pratiquement nulle. De redresseur elle devient un *court-circuit*. Les limites de fonctionnement de la diode sont définies par la température maximale de la jonction au-delà de laquelle elle perd ses propriétés. Cette énergie électrique dissipée dans les redresseurs apparaît sous forme d'énergie thermique, c'est pourquoi il faut très sérieusement étudier les radiateurs sur lesquels ils sont montés. Cette température déplace le coude de la caractéristique inverse. En effet, le courant inverse augmente avec la température. Ce phénomène est plus important pour le silicium que pour le germanium.

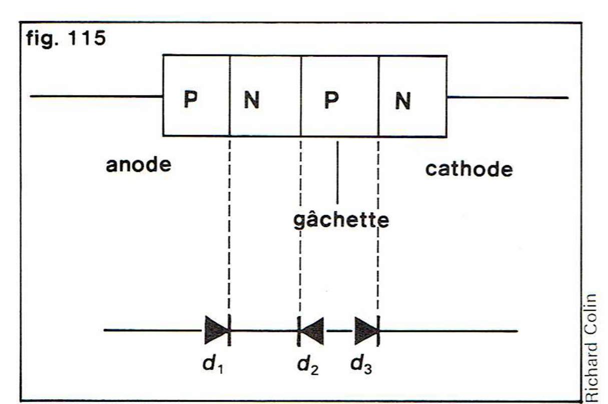


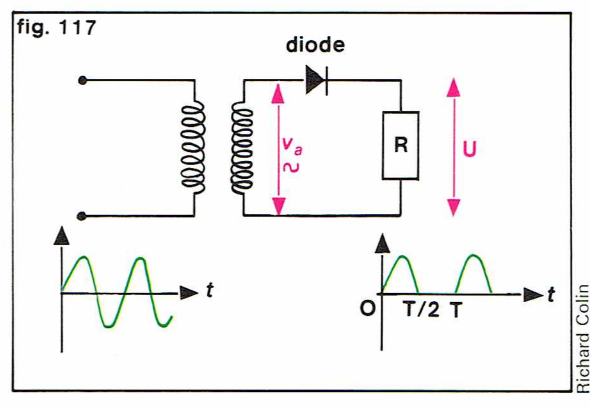
▲ ***Figure 107 : principe de l'échange de courant continu-triphasé entre la France et la Grande-Bretagne.***
Figure 108 : convertisseur alternatif-alternatif.
Figure 109 : convertisseur continu-continu.
Figure 114 : caractéristiques courant-tension d'une diode au silicium.
▼ *Voir page 268.*





▶ *Figure 115 : schéma de principe d'un thyristor.*
Figure 117 : montage avec une diode pour le redressement monophasé une alternance, et courbes caractéristiques.
Figure 118 : montage avec deux diodes pour le redressement monophasé deux alternances, et courbes caractéristiques.





Thyristor

Un thyristor est un semi-conducteur dont la conduction ne peut avoir lieu qu'après avoir appliqué un signal sur une de ses jonctions. Il comporte quatre couches de semi-conducteurs successivement P-N-P-N, soit trois jonctions, chacune d'elles étant une diode (*fig.* 115). Si on applique une tension positive à l'anode, la diode d_2 empêche toute conduction à condition que cette tension soit inférieure à la tension d'amorçage quand le courant de gâchette est nul. Appliquons à la gâchette une tension positive par rapport à la cathode, d_2 devient brutalement conductrice et le thyristor devient conducteur indépendamment de la tension de la gâchette qui peut même être déconnectée. La *figure* 116 donne la caractéristique courant-tension. Le thyristor reste bloqué si on inverse les polarités appliquées à l'anode et à la cathode, quel que soit le potentiel de la gâchette. Pour le bloquer à partir de l'état conducteur, il faut soit diminuer le courant principal qui le traverse à une valeur inférieure au courant de maintien, soit lui appliquer une tension inverse.

Redressement avec diodes

⋆ *Redressement monophasé, une alternance*

La diode ne laissant passer le courant que dans un seul sens, quand on la place dans un circuit alimenté en alternatif, elle ne laisse passer qu'une alternance. Le montage monoalternance est le plus simple que l'on puisse trouver (*fig.* 117).

Calculons la tension moyenne aux bornes d'une charge purement résistive :

$$U_{moy} = \frac{1}{T}\int_0^T v_a dt = \frac{1}{T}\int_0^T V \sin \omega t dt = \frac{V_a}{\pi} = 0{,}318\ V$$

v_a est la valeur instantanée, V est la valeur maximale ou de crête. Si V_{eff} est la valeur efficace, nous avons

$V_{eff} = V/\sqrt{2}$ soit $U_{moy} = \sqrt{2}\, V_{eff} \times 0{,}318 = 0{,}45\ V_{eff}$

L'intensité moyenne qui traverse la résistance est

$$I_{moy} = \frac{U_{moy}}{R}$$

⋆ *Redressement monophasé, deux alternances*

Ce montage nécessite un transformateur à point milieu sur l'enroulement secondaire. Chaque demi-enroulement secondaire ne travaille que pendant la demi-période où la diode est conductrice. Il fonctionne en va-et-vient, chaque moitié du montage correspondant au redressement simple alternance précédent (*fig.* 118). La valeur moyenne aux bornes d'une charge purement résistive est :

$$U_{moy} = \frac{2}{T}\int_0^T v_a dt = \frac{2\ V}{\pi} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_{eff} = 0{,}9\ V_{eff}$$

⋆ *Redressement monophasé, deux alternances, montage en pont*

Ce montage permet d'obtenir les mêmes résultats que le précédent, mais il offre l'avantage de ne pas se servir de transformateur à point milieu. Par contre, il nécessite quatre diodes. Au cours de chaque demi-période, deux diodes conduisent soit les paires d_1-d_3 ou d_2-d_4, suivant la polarité de la tension d'alimentation (*fig.* 119). La valeur moyenne aux bornes de la résistance est

$$U_{moy} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_{eff} = 0{,}90\ V_{eff}$$

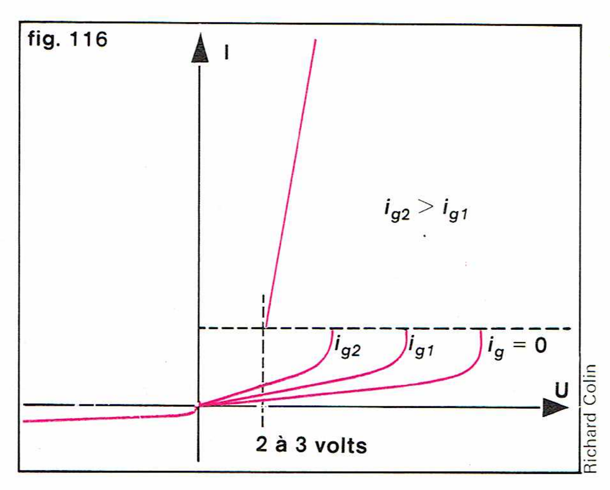
⋆ *Redressement triphasé, simple alternance*

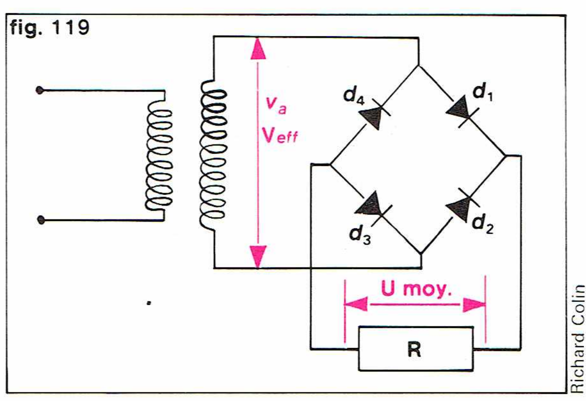
Il faut que le couplage du transformateur placé à l'amont du montage soit D_y (voir chapitre *Transformateurs*).

Les enroulements secondaires alimentent trois diodes (*fig.* 120), chacune d'elles redressant la demi-alternance correspondant à son état de conduction. Les tensions secondaires sont données par les expressions suivantes :

◀ *Page 267, en bas, figure 110 : principe d'une diode. Figure 111 : conduction dans la jonction* NP. *Figure 112 : non-conduction dans la jonction* NP. *Figure 113 : représentation symbolique de la jonction* NP.

▶ *Figure 116 : caractéristiques courant-tension d'un thyristor.*
Figure 119 : montage en pont avec quatre diodes pour le redressement monophasé, deux alternances.





$$v_1 = V \sin \omega t, \quad v_2 = V \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$\text{et} \quad v_3 = V \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)$$

La diode d_1 est conductrice entre t_1 qui correspond à $\frac{T}{12}$ et t_2 qui correspond à $\frac{5T}{12}$. La diode d_2 est conductrice entre t_2 et t_3, soit $\frac{5T}{12}$ et $\frac{9T}{12}$. La diode d_3 est conductrice entre t_3 et t_1, soit $\frac{9T}{12}$ et T.

Quand une diode conduit, les deux autres sont bloquées. La tension aux bornes de la charge ne s'annule pas. La valeur moyenne de la tension U_{moy} s'obtient en prenant comme période d'intégration $t_1 — t_2$,

soit $$\frac{5T}{12} - \frac{T}{12} = \frac{4T}{12} = \frac{T}{3}$$

$$U_{moy} = \frac{1}{\frac{T}{3}} \int_{T/12}^{5T/12} v_a dt = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V = 0{,}825 \text{ V}$$

* *Redressement triphasé, deux alternances*

C'est un pont de Graetz triphasé comprenant six diodes (*fig.* 121). Il n'utilise pas le point neutre du secondaire du transformateur. La valeur moyenne de la tension s'obtient en prenant comme période d'intégration $t_1 — t_2$, soit

$$\frac{2T}{6} - \frac{T}{6} = \frac{T}{6}$$

$$U_{moy} = \frac{1}{\frac{T}{6}} \int_{T/6}^{T/3} v_a dt = \frac{3}{\pi} V = 0{,}955 \text{ V}$$

A un instant donné, deux diodes seulement sont conductrices. La période de la tension redressée est égale à celle de la tension d'alimentation divisée par 6.

Deux autres montages sont utilisés en triphasé : redressement double alternance avec utilisation du point milieu des enroulements secondaires du transformateur d'alimentation et double étoile.

Pour ces deux dernières solutions, les valeurs moyennes de la tension sont toujours $U_{moy} = 0{,}955$ V.

* *Alimentation d'une charge inductive*

Il est assez rare que la charge d'un redresseur ne soit constituée que d'une résistance pure. Le plus souvent, il alimente des moteurs à courant continu ou des électro-aimants qui se composent d'une résistance pure et d'une inductance en série. L'intensité qui traverse le circuit est donnée par la solution de l'équation différentielle dans le cas d'un redressement simple alternance :

$$V \sin \omega t = Ri + L \frac{di}{dt} \quad \text{soit :}$$

$$i = \frac{V}{\sqrt{R^2 + L^2\omega^2}} \left[\sin(\omega t - \varphi) + \sin \varphi e^{-\frac{Rt}{L}}\right]$$

avec $\operatorname{tg} \varphi = \frac{L\omega}{R}$.

* *Alimentation d'une charge capacitive*

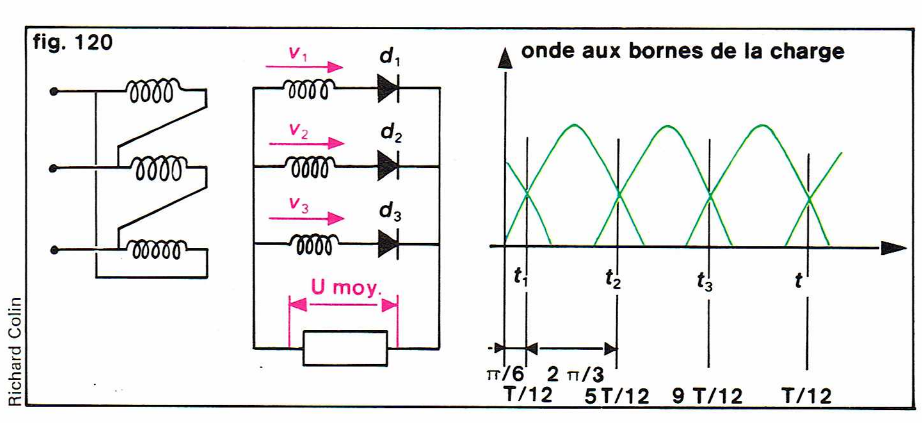
En régime permanent, le condensateur se charge de l'instant t_0 à l'instant t_1, puis se décharge, dans la résistance, dans l'intervalle de temps t_1 à $T + t_0$ (*fig.* 122).

Le passage de courant i n'a lieu qu'à partir du moment où le potentiel du point A est supérieur à celui du point B. Si la constante de temps du circuit RC est grande, la décroissance de la tension u est faible. L'intensité débitée par la diode est donnée par l'équation :

$$i = \omega C \frac{dv}{d\theta} + I_c = \omega CV \cos\theta + I_c$$

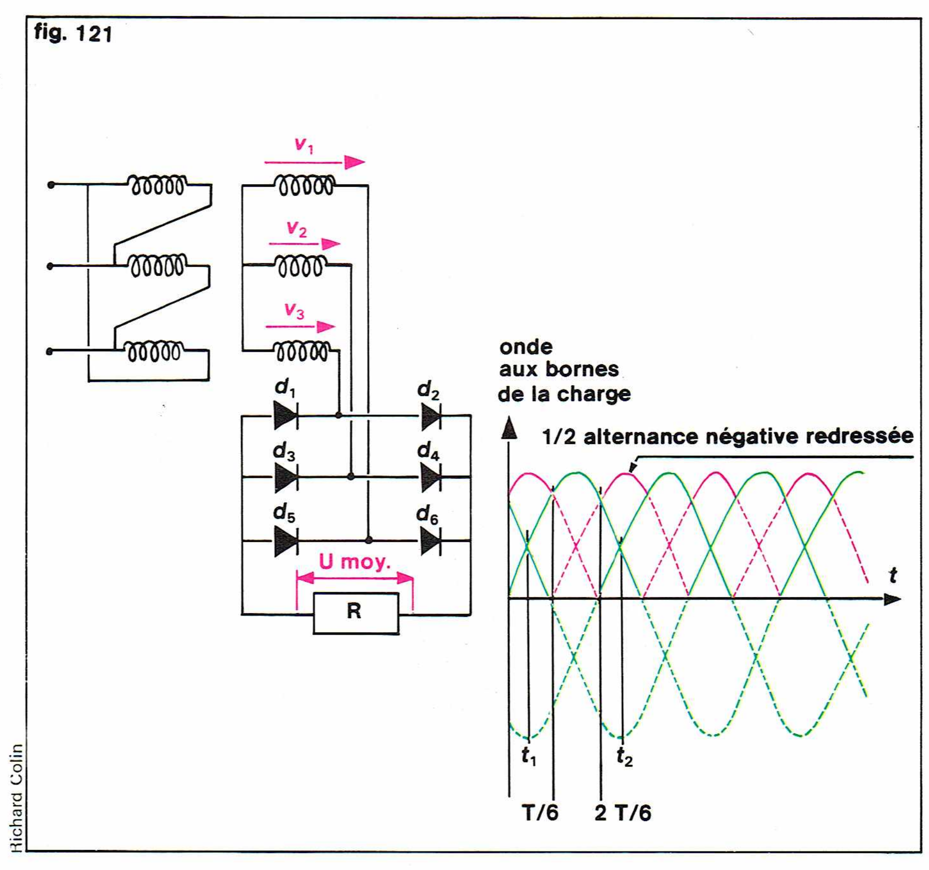
et elle ne peut débiter que si la relation $\frac{dv}{d\theta} > -\frac{I_c}{\omega C}$ est satisfaisante.

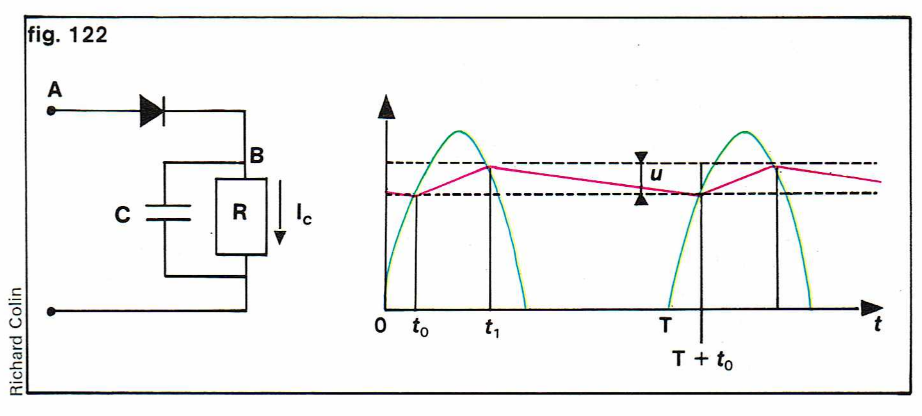
* *Alimentation d'une charge ayant une force contre-électromotrice*

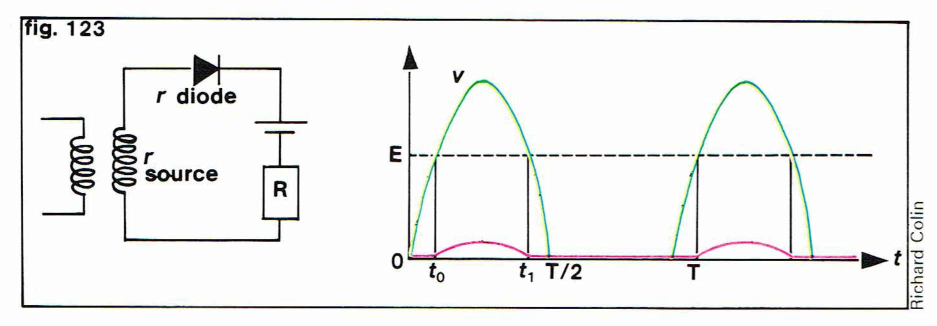


▲ ***Figure 120 : montage avec trois diodes pour le redressement triphasé simple alternance, et courbe caractéristique.***

▼ ***Figure 121 : montage en pont de Graetz à six diodes pour le redressement triphasé deux alternances, et courbe caractéristique.***
Figure 122 : montage avec une diode permettant la charge et la décharge d'un condensateur et courbes de charge et de décharge du condensateur.

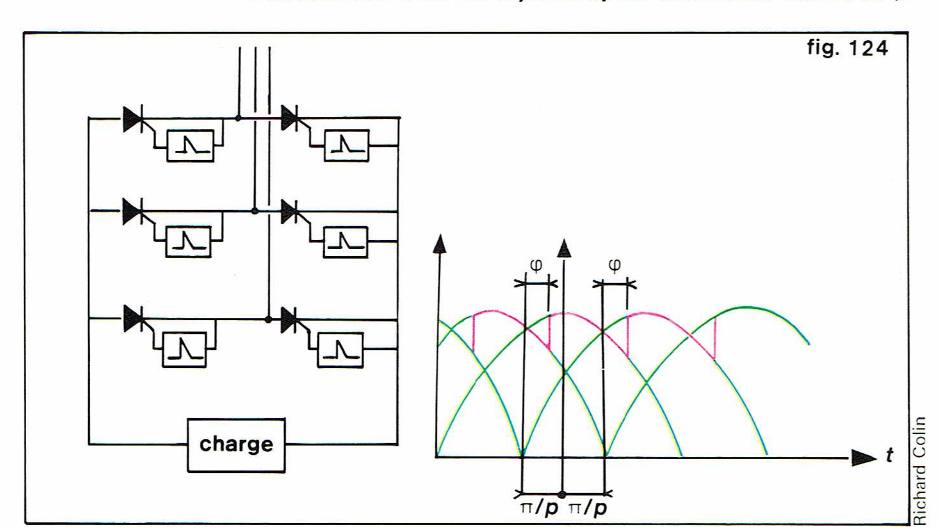


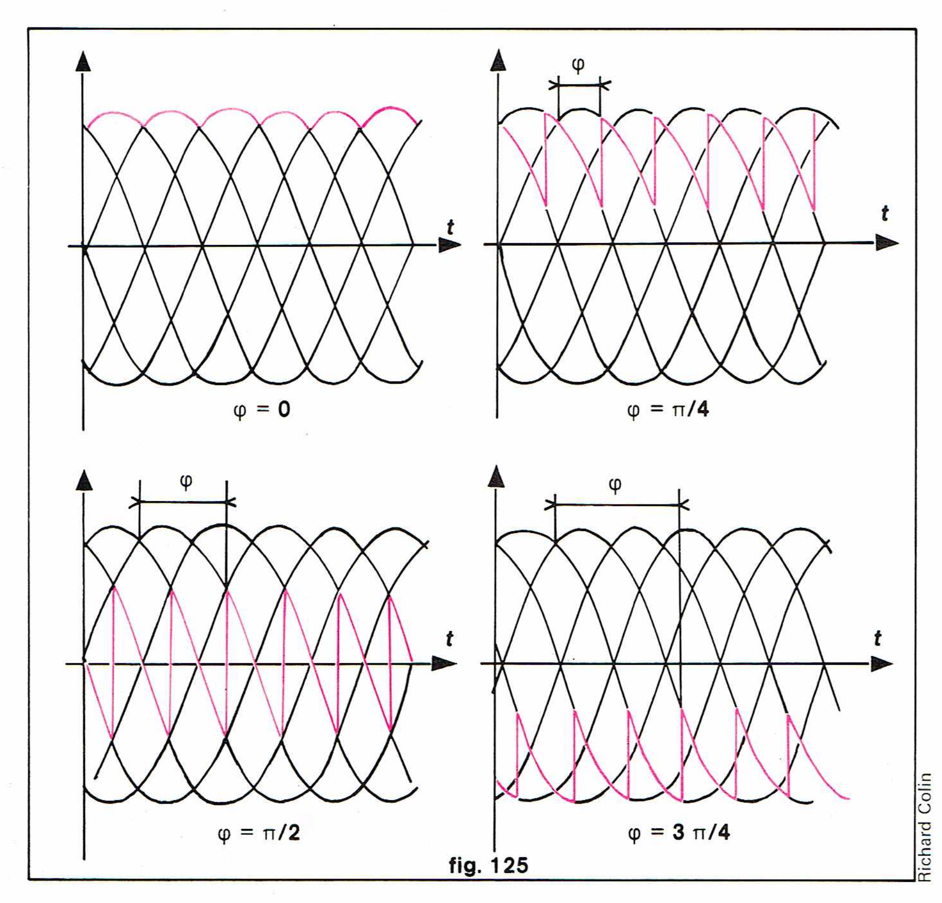




▲ *Figure 123 : montage comprenant une diode pour l'alimentation d'une charge ayant une f. é. m. (pour charger par exemple une batterie d'accumulateurs).*

▼ *Figure 124 : montage avec six thyristors pour le redressement triphasé deux alternances.*
Figure 125 : courbes des valeurs moyennes de la tension obtenue (U_{moy}) après redressement avec des thyristors pour différentes valeurs de φ.





Pour que la diode conduise, il faut que le potentiel du point A soit supérieur à celui de B. Or, la force contre-électromotrice impose au point B un potentiel égal à E. La diode n'est conductrice que dans l'intervalle $t_0 - t_1$ (*fig.* 123). L'intensité qui la traverse est :

$$i = \frac{v - E}{R + r_d + r_s}$$

et la valeur moyenne :

$$I_{moy} = \frac{1}{\frac{T}{2}} \int_{t0}^{t1} \frac{v - E}{R + r_d + r_s} dt$$

Ce montage est utilisé pour charger les batteries d'accumulateur. La variation de la valeur maximale de v, qui a pour but de régler la charge, est obtenue simplement en utilisant un transformateur à prises. L'utilisation du redressement monophasé simple alternance n'est pas conseillée, il vaut mieux employer la double alternance ou, si possible, le redressement triphasé ou hexaphasé.

Redressement avec thyristors

L'emploi de thyristors à la place de diodes permet un redressement contrôlé en employant l'un quelconque des montages précédents. La valeur moyenne est ajustée à volonté par variation du retard à la commutation. Soit un montage triphasé redressement deux alternances (*fig.* 124). Chaque thyristor a son générateur d'impulsions de commande. Ils sont évidemment liés entre eux pour que toute variation du point d'allumage se fasse simultanément sur les six thyristors. La tension obtenue a pour période $2\pi/p$. Pour obtenir sa valeur moyenne, il faut prendre la période comme l'intervalle d'intégration en ayant, au préalable, translaté l'axe vertical pour qu'il se place au sommet d'une des sinusoïdes. L'équation qui permet de calculer cette valeur moyenne est :

$$U_{moy} = V \frac{p}{2\pi} \int_{\varphi - \frac{\pi}{p}}^{\varphi + \frac{\pi}{p}} \cos x \, dx =$$

$$V \frac{p}{2\pi} \left[\sin\left(\varphi + \frac{\pi}{p}\right) - \sin\left(\varphi - \frac{\pi}{p}\right)\right] =$$

$$V \frac{p}{\pi} \sin \frac{\pi}{p} \cos \varphi$$

Ce résultat est général et applicable aux redresseurs avec diodes. Par exemple, en redressement monophasé simple alternance, nous obtenons :

$$U_{moy} = V \frac{2}{\pi} \sin \frac{\pi}{2} = \frac{2}{\pi} V = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_{eff}$$

Suivant la valeur de φ, les résultats sont représentés par la *figure* 125.

Filtrage

Les tensions redressées sont toujours ondulées. La valeur de l'ondulation dépend du montage utilisé. Ce résultat peut être néfaste et il est souvent nécessaire de filtrer la tension de sortie pour obtenir une onde la plus constante possible. Les éléments les plus utilisés sont les capacités et les inductances. Un montage rencontré très couramment est le filtre en π. Il se compose de deux capacités et d'une inductance comme le montre la *figure* 126. L'inductance, quelquefois remplacée par une résistance, offre une forte impédance aux harmoniques de fréquences élevées qui passent par les condensateurs. Ces condensateurs ont une capacité suffisante pour maintenir une tension utilisable pratiquement constante. Il existe des filtres de toute sorte qui sont des assemblages de cellules montées en série.

Autres transformations de l'énergie

Dans les paragraphes précédents, ont été présentés en détail les principes et la technologie de la transformation de l'énergie dans les domaines thermique, mécanique et électrique. Ces développements étaient justifiés par l'importance de ces trois types de transformations dans notre vie quotidienne. La vie domestique nous fournit de nombreux exemples de transformateurs d'énergie dans

les trois domaines cités ci-dessus : radiateurs de chauffage central, leviers et entraînements divers, et transformateurs électriques de jouets motorisés pour n'en citer que quelques-uns.

Dans ce chapitre, nous examinerons plus succinctement les trois autres domaines de la transformation énergétique : énergie chimique, énergie rayonnante et énergie nucléaire. Là encore, le but recherché est généralement de modifier l'état initial de l'énergie pour l'adapter à l'usage auquel elle est destinée.

Transformations de l'énergie chimique

On sait que dans la plupart des réactions chimiques il y a dégagement ou absorption de chaleur. Pour satisfaire à la loi sur la conservation de l'énergie, ces variations, tantôt positives, tantôt négatives, d'énergie thermique doivent correspondre à des variations équivalentes et de sens contraire d'une autre forme d'énergie. Cette autre forme n'est autre que l'énergie chimique des produits qui sont entrés en réaction. En résumé, la variation d'énergie chimique est égale et de signe contraire à la variation de chaleur accompagnant la réaction.

Le domaine des transformations de l'énergie chimique est donc très vaste puisqu'il y a transformation de l'énergie chimique dans la quasi-totalité des réactions chimiques. Notons qu'il n'est pas possible de mesurer la valeur absolue de l'énergie chimique; on ne peut qu'apprécier ses variations lors des réactions.

Pour revenir au domaine énergétique qui nous préoccupe, les transformations qui nous intéressent sont celles relatives aux produits énergétiques, c'est-à-dire essentiellement les combustibles. Considérons tout d'abord les produits naturels constitués par les combustibles fossiles les plus utilisés, à savoir le charbon, le pétrole et le gaz naturel. Les produits bruts tels qu'ils sont obtenus après leur extraction subissent divers traitements avant de devenir des produits commerciaux, répondant à une utilisation technique bien définie. Avant leur transport, les produits bruts subissent généralement les traitements de nature physique tels que triage, déshydratation, séparation des impuretés, etc., qui ne modifient pas la structure chimique de leurs composés. C'est ensuite, dans des installations appropriées, que s'effectuent les transformations chimiques nécessaires pour produire les combustibles dans leur forme utilisable.

● Les *charbons* sont employés directement lorsqu'ils sont destinés à la combustion, mais ils sont difficiles à transporter et leur état solide ne facilite pas leur utilisation. On songe depuis longtemps à leur transformation en gaz. La combustion est déjà un processus de gazéification puisque ses résultats, à part les résidus solides, sont tous gazeux. On réserve en fait le terme de gazéification aux procédés conduisant à des produits gazeux susceptibles de se substituer au gaz naturel, soit pour des applications purement énergétiques en raison de la facilité d'emploi des combustibles gazeux, soit pour servir d'élément de synthèse à l'industrie chimique.

Les principes de base du processus de gazéification du charbon sont connus depuis longtemps et de nombreux procédés ont déjà été mis au point et brevetés dans de nombreux pays. Cependant, compte tenu de l'importance des réserves mondiales de charbon et de l'intérêt attaché à sa gazéification, les recherches se poursuivent toujours activement dans ce domaine. Il s'agit généralement de faire réagir le charbon avec de l'air, de l'oxygène, de la vapeur, du gaz carbonique ou un mélange de plusieurs de ces produits. On récolte de ces réactions un mélange des composés suivants : oxyde de carbone, hydrogène et méthane auxquels peuvent se rajouter d'autres composés chimiques comme le soufre, dans des rapports dépendant du charbon et des réactifs utilisés ainsi que des conditions de température et de pression du réacteur de gazéification. Ces gaz subissent ensuite d'autres transformations dans des réacteurs, en présence de catalyseur, avant d'être utilisables.

Il a été envisagé d'effectuer la première étape de gazéification directement dans le sol de façon à éliminer les problèmes d'exploitation des mines de charbon qui sont d'autant plus ardus que les gisements sont enfouis profondément. Les études déjà entreprises dans divers pays charbonniers n'ont pas débouché jusqu'à aujourd'hui sur des réalisations de grande envergure.

Mais la gazéification *in situ* est de nouveau considérée comme une voie intéressante d'exploitation du charbon depuis l'augmentation brutale du prix de l'énergie, et de nouveaux programmes de recherche ont été lancés, en particulier aux États-Unis.

● Le *pétrole brut* est un mélange très varié d'hydrocarbures contenant en outre un faible pourcentage de produits oxygénés, azotés, sulfurés, etc. La composition en hydrocarbures varie énormément d'un gisement à un autre et parfois même dans le même gisement. Cette grande diversité dans les compositions, d'une part, et la variété en qualité et quantité des produits commerciaux, d'autre part, expliquent qu'il existe un grand nombre de traitements de raffinage.

La simple distillation du brut permet de séparer plus ou moins grossièrement suivant le but recherché les différents hydrocarbures en utilisant les différences de température des points d'ébullition (la température d'ébullition augmente avec la masse moléculaire). On arrive ainsi à séparer les différentes fractions : gaz, essence, gas-oil, fuel, résidus divers. Mais les proportions ainsi obtenues ne correspondent pas aux besoins du marché. On a en général besoin de beaucoup plus de carburant auto que n'en contiennent les pétroles bruts raffinés. D'autres produits sont également recherchés en quantité importante comme le gas-oil et le kérosène. Il faut donc soit casser les molécules lourdes pour obtenir des molécules plus légères, et ce sont les différents types de cracking, soit recombiner des produits gazeux et des molécules légères par polymérisation.

Les différents procédés de cracking sont le cracking thermique, le cracking catalytique et l'hydrocracking.

Dans le *cracking thermique*, le seul agent utilisé pour casser les molécules est la température.

Dans le *cracking catalytique*, le produit à traiter est également chauffé, à des températures inférieures à celles du cracking thermique, et en présence de catalyseur. Comme, à partir d'un brut, on obtient beaucoup plus d'essence et de meilleure qualité par cette voie, le cracking catalytique est le procédé le plus largement employé aujourd'hui.

L'*hydrocracking*, d'application industrielle plus récente, est un cracking de type catalytique en présence d'hydrogène. La présence d'hydrogène permet d'obtenir des produits de haute qualité, ce qui laisse prévoir un grand développement de cette méthode.

● Le *gaz naturel* est également un mélange d'hydrocarbures dont les deux éléments principaux sont le méthane et l'éthane. Certains éléments étrangers comme le soufre doivent être retirés, sinon le gaz naturel est disponible pour l'emploi sans transformations complexes et c'est ce qui fait tout son intérêt.

Transformations de l'énergie rayonnante

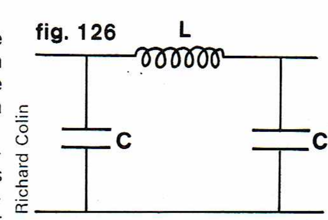
Les échanges d'énergie entre un corps et le milieu extérieur ou entre deux corps peuvent s'effectuer sous la forme de rayonnement constitué par des ondes électromagnétiques.

Nous avons vu qu'habituellement, dans un transport d'énergie, la matière se déplace avec son énergie cinétique et son énergie interne. Dans le processus de transport d'énergie par radiation, les phénomènes utilisés sont du type ondulatoire. Une onde qui se propage peut transporter de l'énergie sans transfert de masse. Une onde simple se caractérise par une loi cyclique (sinusoïde par exemple) qui définit sa fréquence et son amplitude. Dans la réalité, les ondes sont souvent plus compliquées, car elles sont le résultat d'un grand nombre d'ondes élémentaires.

Transformer l'énergie rayonnante consisterait donc à modifier les caractéristiques des rayonnements mis en œuvre. Mais ce type de transformation n'est pas très répandu. On peut citer néanmoins comme exemple l'effet de serre qu'on utilise dans les capteurs solaires du type thermique.

Même si l'énergie rayonnante joue un rôle essentiel dans les échanges d'énergie entre les corps qui conduisent à l'équilibre thermique, cette forme d'énergie n'a été jusqu'à présent employée de façon systématique que dans les hautes températures.

L'utilisation prochaine de l'énergie solaire ainsi que certains développements comme celui du laser donneront un nouveau champ d'application aux conversions et aux transformations d'énergie rayonnante.



Richard Colin

▲ *Figure 126 : le filtre en π, montage utilisé pour filtrer la tension de sortie d'un redresseur.*
▼ *Une tour de cracking : après distillation du pétrole brut, certaines molécules lourdes sont cassées pour obtenir des molécules plus légères : il s'agit là d'une transformation de l'énergie chimique.*



Photothèque Total

Transformations de l'énergie nucléaire

L'énergie nucléaire est liée à l'organisation des noyaux des atomes. La radio-activité naturelle, qui est due à des réactions nucléaires spontanées, a permis de mettre en évidence cette forme d'énergie. On connaît les progrès réalisés depuis une quarantaine d'années dans la mise en œuvre à des fins civiles de ce type d'énergie.

Ce type d'énergie est caractérisé tout d'abord par l'importance des quantités d'énergie mises en jeu lors des réactions nucléaires : l'énergie libérée est environ un million de fois plus élevée dans la réaction nucléaire que dans une réaction chimique intéressant le même nombre d'atomes. Ensuite, il est difficile de domestiquer l'énergie des noyaux, contrairement à ce qui se passe pour d'autres formes d'énergie. Certaines réactions chimiques, comme par exemple la combustion, sont relativement faciles à mettre en œuvre. On ne connaît pratiquement que deux types de réactions nucléaires pouvant être utilisées dans la maîtrise de ce type d'énergie : la *fission* et la *fusion*.

Cette difficulté d'accéder à l'énergie nucléaire fait que la transformation d'énergie dans ce domaine a paru longtemps impossible, contrairement à ce qui se passe pour l'énergie chimique où toutes les réactions donnent lieu à des modifications de l'énergie chimique disponible.

En fait, cette impossibilité a été levée dès que l'on a disposé de flux de neutrons comme on en rencontre aujourd'hui couramment dans les réacteurs nucléaires. Les noyaux soumis à un tel flux subissent par absorption d'un neutron une véritable transmutation, réalisant ainsi le rêve des alchimistes de transformer un corps en un autre.

Dans le domaine énergétique, c'est la fabrication d'éléments fissiles, c'est-à-dire susceptibles de subir la fission dans un réacteur nucléaire, qui nous intéresse. On a vu que ce processus se produit dans tous les réacteurs dès lors que se trouve en place dans le cœur ou autour du cœur un matériau fertile. Ce qualificatif s'applique justement aux noyaux susceptibles d'être transformés, soit directement, soit indirectement, en noyaux fissiles par capture des neutrons. Les matériaux fertiles que l'on connaît sont l'uranium 238 et le thorium 232.

L'uranium 238, sous bombardement de neutrons, se transforme en plutonium qui est un élément fissile. Le thorium 232 se transforme dans les mêmes conditions en uranium 233, élément également fissile.

Il est donc possible de transformer des éléments de peu d'intérêt énergétique en matériau fissile en les plaçant dans un réacteur nucléaire. Cette opération se fait, dans la plupart des réacteurs et la nouvelle matière fissile ainsi formée est d'abord utilisée sur place, et ensuite, le cas échéant, extraite du combustible irradié pour servir à la fabrication de nouveaux éléments combustibles.

Si la substance fissile produite par le réacteur à partir de la substance fertile est différente de la substance fissile consommée par les réactions nucléaires prenant place dans le réacteur, on parle alors de *conversion* et le réacteur est appelé un *convertisseur*. C'est le cas par exemple des réacteurs à eau légère dont le combustible est de l'uranium enrichi U 238 enrichi en U 235. La matière fissile consommée est du plutonium.

Si, au contraire, la matière fissile produite est la même que celle qui a été consommée, on a alors un *réacteur régénérateur*. C'est le cas par exemple d'un réacteur contenant de l'uranium U 238 et fonctionnant avec du plutonium comme matière fissile. Certains réacteurs de ce type peuvent fabriquer plus de matières fissiles qu'ils n'en consomment et on les appelle pour cette raison des *réacteurs surrégénérateurs*.

On voit que la transformation d'un élément en un autre est possible par réaction nucléaire. Une telle transformation revêt une importance capitale si l'élément produit est fissile et donc susceptible de restituer d'énormes quantités d'énergie par fission. Les réserves d'uranium 238 et de thorium 232 qui sont sans valeur aucune constituent en fait des réserves potentielles de matières fissiles dès lors qu'il est techniquement possible d'assurer les transformations convenables dans des réacteurs.

Les réacteurs à eau légère construits aujourd'hui ne sont que de mauvais convertisseurs qui utilisent donc très mal les matériaux fertiles dont on les charge. On voit donc tout l'enjeu qui se cache derrière la mise au point de réacteurs bons convertisseurs ou bons régénérateurs, et en particulier de réacteurs surrégénérateurs.

TRANSPORT ET DISTRIBUTION DE L'ÉNERGIE

Le transport de l'énergie devrait être considéré en toute logique comme un cas particulier du transport des marchandises. Mais l'énergie n'est pas un bien comme les autres, et elle s'intègre mal dans les études générales sur les transports : on constate effectivement que la plupart de ces études omettent bien souvent de traiter le cas particulier de l'énergie. Comment rapprocher, en effet, les mouvements d'énergie électrique avec le transport d'hydrocarbures par oléoducs et gazoducs, ou celui du charbon par minéraliers ?

Pourtant, si l'apparence externe du produit transporté est fort différente, il s'agit, comme cela a déjà été maintes fois signalé, de la même substance : l'énergie aux multiples visages.

On pourrait remarquer que certains produits n'ont pas seulement une vocation énergétique, comme les hydrocarbures par exemple, et à ce titre, il faudrait les considérer comme de simples matières premières. Mais cette distinction n'est pas encore aujourd'hui significative dans la mesure où le caractère énergétique d'un produit est tenu pour essentiel dans notre monde qui est, selon l'image consacrée, assoiffé d'énergie.

Le transport de l'énergie, matière première précieuse entre toutes, se présente donc comme le mouvement d'un produit énergétique d'un point où il est produit vers un autre point où il est désiré pour être consommé.

Sur cette définition au caractère évident, on remarquera tout d'abord que le problème du transport se pose du fait qu'il existe une distance entre le gisement et l'utilisateur. Ce paramètre important que constitue la distance, cet obstacle pourrait-on dire, est toujours analysé en termes de « temps » et de « coût ». Qu'importent les kilomètres si l'obstacle qu'ils établissent est facilement franchi, c'est-à-dire rapidement et à coût faible !

A ces critères qui, en fait, n'en forment qu'un purement économique puisque « le temps, c'est de l'argent », s'ajoutent des critères secondaires dont le plus significatif est certainement la sûreté d'alimentation. Pour cette raison, une source énergétique localisée dans un pays prend pour celui-ci une valeur considérable puisque à la proximité de cette source s'ajoute la sûreté d'approvisionnement. Dans le même esprit, un pays s'efforcera dans toute la mesure du possible de diversifier pour une forme d'énergie donnée ses sources énergétiques afin d'éviter les inconvénients liés à la défaillance de l'une d'entre elles.

On a posé ci-avant le problème du transport en considérant un gisement et un utilisateur. La réalité à l'échelle mondiale est, on le sait, beaucoup plus complexe : il existe plusieurs zones de gisements et les points d'utilisation sont extrêmement nombreux.

Il va donc se créer tout un ensemble de liaisons pour acheminer les produits avec un certain nombre de stockages le long des lignes de transport, et des bouclages pour garantir l'alimentation de façon à permettre le fonctionnement convenable de l'ensemble. On vient de façon schématique de décrire un *réseau de transport*.

L'utilisation de ce terme de réseau est souvent limitée en matière d'énergie au transport de l'énergie électrique, à l'exclusion des autres substances énergétiques telles que le charbon, le pétrole, le gaz naturel, pour ne citer que les plus importantes. En fait, cette restriction n'est pas fondée, car chaque substance sécrète son réseau.

Autre remarque de vocabulaire : on désigne habituellement par « *transport* » le premier mouvement entre la source et un point de traitement. Il est rare en effet que les conditions optimales de transport, qu'il faut rechercher puisqu'il s'agit à ce stade initial de transporter de grandes quantités d'énergie, soient celles de l'utilisation. Il est donc nécessaire de prévoir ensuite une transformation suivie de l'éclatement vers les points d'utilisation. Cette seconde étape est celle de la « *distribution* ».

L'énergie électrique est transportée par exemple sous de très hautes tensions de plusieurs centaines de kilovolts et distribuée sous des tensions allant de 220 volts pour le secteur domestique à quelques kilovolts pour la petite industrie.

Les différentes sources d'énergie ont joué successivement, comme on l'a montré au chapitre sur les ressources, leur rôle dans l'histoire de l'humanité : le bois d'abord, le charbon ensuite, puis le pétrole, le gaz, et aujourd'hui le nucléaire. A un moment donné, différentes sources d'énergie coexistent, entretenant entre elles une vive compétition.

On compare souvent entre elles les différentes substances énergétiques en mettant en regard leurs avantages et leurs inconvénients. Il est frappant de constater que s'il existe des états d'équilibre successifs ,l'évolution, c'est-à-dire le remplacement progressif d'une source d'énergie par une autre, se produit bien avant l'épuisement de la première source. Le bois a été éliminé par le charbon, et ce dernier s'est vu supplanté par le pétrole puis par le gaz naturel alors que les réserves de bois et surtout celles de charbon sont tout à fait considérables.

Il est admis aujourd'hui que ce ne sont plus les qualités intrinsèques des substances énergétiques qui leur permettent de s'imposer mais un ensemble de caractéristiques parmi lesquelles l'aptitude au transport joue un rôle déterminant. Cette aptitude n'est pas la seule à considérer; il faut citer aussi les possibilités de conversion et de transformation qui permettront l'utilisation de réseaux existants, et les facilités de stockage. Ce dernier point est aussi d'importance et il sera examiné dans le prochain chapitre.

Comment définir les qualités d'un réseau de transport? Ce n'est pas une question simple dans la mesure où celui-ci peut revêtir des formes très diverses.

Tout d'abord, il faut mentionner le *rendement de l'opération* qui traduira la perte d'énergie occasionnée par le transport. L'origine en sera une perte de charge dans une conduite ou une perte en ligne sur un réseau électrique par exemple. Dans tous les cas, ce rendement pourra s'exprimer en termes de perte d'énergie ou en coût. On sait que le transport et la distribution de l'énergie électrique dans un pays comme la France entraînent une perte de 7 à 8 % de l'énergie produite.

La *sûreté d'alimentation* sera ensuite un aspect important d'un réseau de distribution. Ce dernier en effet doit être capable de faire face à un certain nombre de situations sans grave interruption de service.

L'*interconnexion des réseaux*, qui permet de prendre en compte la défaillance de quelques sources d'alimentation tout en profitant de l'écrasement de la demande par l'effet de foisonnement, est une nécessité indiscutable.

Il faudrait signaler enfin d'autres aspects plus techniques de l'exploitation des réseaux comme le problème du comptage, c'est-à-dire l'évaluation des quantités d'énergie transportées et distribuées.

Pour illustrer le rôle déterminant du transport dans la création d'un réseau et dans le développement d'une nouvelle source d'énergie, nous développerons à présent quelques exemples.

— L'électricité s'est rapidement imposée, car sa distribution est très facile. En revanche, cette forme d'énergie se transporte mal en raison des pertes en ligne qui deviennent prohibitives avec les techniques actuelles. La distance moyenne de transport est de 100 km environ. Ceci explique les recherches actuelles sur l'amélioration des réseaux de transport électrique.

Cette contrainte du transport est très pesante puisqu'elle oblige à placer les usines de production près des centres de consommation. Elle freine l'exploitation de ressources énergétiques passant par la conversion électrique et éloignées des centres de consommation, comme certains « gisements » hydrauliques d'Afrique ou d'Amérique du Sud, ou thermiques des eaux océaniques. La mise en valeur de ces richesses se fera donc très probablement par conversion sur place de l'énergie électrique produite en une forme énergétique plus facilement transportable, plutôt que par industrialisation des zones situées à proximité des gisements.

— Le gaz naturel, à l'opposé, se transporte très bien, ce qui explique la pénétration rapide de cette forme d'énergie dans nos économies. La distance de transport économique du gaz dépasse les 1 000 km, ce qui justifie la mise en place de réseaux d'échelle continentale, comme on peut le constater en Europe ou aux États-Unis. Le gaz naturel doit donc, selon toute vraisemblance, poursuivre son développement dont on prévoit le point culminant vers la fin de ce siècle.

— Le nucléaire pose un problème particulier. Dans l'état actuel des techniques, on sait que l'exploitation de cette forme d'énergie passe par l'électricité. Pour le nucléaire, c'est à la fois un avantage puisque le réseau de transport et de distribution existe et qu'il suffit donc d'ajouter les centrales nucléaires aux usines électrogènes existantes (à combustibles fossiles et hydrauliques) ; et un inconvénient pour son développement puisque la quantité d'énergie qui pourrait être fournie par le nucléaire sera limitée par les besoins des utilisateurs du réseau. Cette limite, dans les pays industrialisés, se situe, dans l'état actuel des choses, entre 30 et 40 % de l'énergie totale consommée.

Le nucléaire se voit donc assigner une limite qui ne pourra être franchie que par une ouverture de nouveaux marchés à l'électricité ou par un changement radical du support énergétique. Cela signifie que l'électricité fournie par les centrales nucléaires devrait être utilisée pour fabriquer une nouvelle substance énergétique.

On pense que la meilleure solution serait d'obtenir un combustible gazeux qui pourrait remplacer le gaz naturel lorsque celui-ci commencera à s'épuiser.

Plusieurs procédés existent et le plus prometteur est peut-être l'emploi de l'hydrogène. Il n'existe pas encore de techniques industrielles capables de produire l'hydrogène avec une faible consommation d'énergie, mais les recherches dans ce domaine sont nombreuses et on entrevoit aujourd'hui des solutions intéressantes. L'hydrogène produit commencerait par se substituer au gaz naturel pour le remplacer ensuite définitivement.

On voit ici l'importance des possibilités de conversion pour une forme énergétique, car cela lui permet de s'implanter sur des réseaux de transport et de distribution qui au départ n'étaient pas faits pour elle.

— Le charbon, on le sait, se transporte mal. Toutefois, les réserves de ce combustible sont considérables. On comprend alors tout l'intérêt de la gazéification du charbon qui conférerait à ce dernier l'aptitude à être transporté facilement qui lui manque aujourd'hui.

La mise en valeur sur une grande échelle des immenses réserves charbonnières passe sans nul doute par la gazéification de ce produit.

— Si on considère à présent l'énergie solaire, il faut constater que celle-ci est, selon l'expression habituelle, déjà distribuée. C'est là encore un avantage et un inconvénient. L'avantage est, semble-t-il, l'inutilité d'un réseau. En fait, compte tenu de la dilution du rayonnement solaire, cette forme d'énergie est condamnée, si on l'utilise sans concentration, à un rôle d'énergie d'appoint. Son exploitation sur une grande échelle passera donc par la construction de centrales solaires électrogènes qui concentreront la puissance solaire pour la convertir en électricité qui sera alors injectée dans le réseau électrique pour y être transportée et distribuée.

On voit toute l'importance que prend le transport dans le développement d'une nouvelle source énergétique. Le poids d'un réseau dans un tel développement est tout à fait considérable, étant donné l'importance des investissements que représente sa création. Au départ, l'absence du réseau est un frein au développement : ainsi, pendant longtemps, on a brûlé sur place du gaz naturel et on a fermé des gisements qui ne contenaient que du gaz, car le produit, non transportable, était inexploitable. Lorsque le réseau existe, sa présence est une incitation à l'utiliser et il freine le développement d'une énergie concurrente.

Le poids des investissements à consentir et le temps de mise en place d'un réseau sont tels qu'il n'est pas possible de modifier rapidement les circuits de l'énergie dans une économie donnée. A ce titre, les problèmes liés au transport de l'énergie participent à la lourdeur de mise en œuvre de toute politique énergétique.

Distribution de l'énergie chimique

Les moyens de transport et de distribution de l'énergie chimique varient avec la nature des combustibles. Il s'agit en fait d'un poste très important de l'économie de l'énergie.

Nous avons vu précédemment que les écarts de coût de production étaient très grands selon les zones géographiques. L'effort technique a porté sur la réduction du coût de transport qui est un élément capital dans le choix de la source d'énergie à aménager ou à utiliser.



P. Koch - Rapho

▲ *Transport de charbon par chemin de fer à partir d'une mine à ciel ouvert en Colombie britannique (Canada); on peut noter, au centre, une unité de traction composée de trois locomotives.*

Les paramètres qui composent les frais de transport sont : les frais de manutention aux extrémités du trajet parcouru, les frais fixes dus aux installations, les frais d'exploitation. La valeur relative de ces trois facteurs varie considérablement selon la forme d'énergie et le moyen utilisé.

Une comparaison sur la base d'une unité énergétique commune des frais entraînés par les divers modes de transport ne tiendrait pas compte de leur rendement ni des obstacles physiques auxquels certains se heurtent, ni enfin de l'utilisation finale. On ne peut comparer les moyens de transport de l'énergie que dans les cas où plusieurs méthodes s'offrent pour transporter : soit la même forme d'énergie; soit des formes d'énergie qui peuvent se substituer l'une à l'autre pour une utilisation donnée; soit une énergie primaire et une énergie secondaire qui peut en dériver (électricité).

On ne peut donc pas formuler de lois générales, car il faut tenir compte de l'équivalence énergétique des formes d'énergie transportées.

Transport des combustibles solides

Le transport du charbon peut se faire, lorsqu'il s'agit de franchir les mers, par minéraliers, et sur terre par chemin de fer, par voies navigables intérieures ou par carboducs.

Le transport ne se justifie que si le pouvoir calorifique est suffisamment élevé (supérieur à 4 500 calories/kg). Le lignite doit préalablement être transformé en briquettes ou être utilisé sur place.

Les coûts de transport des combustibles solides sont trop élevés et expliquent qu'en fait une faible partie de la production soit exportée.

Les avantages à la production doivent compenser les pertes sur le transport pour permettre la compétitivité sur les marchés consommateurs. C'est le cas des charbons américains exportés vers l'Europe.

Le transport par chemin de fer du charbon a longtemps représenté une part importante du trafic. Des progrès techniques ont été apportés concernant l'augmentation des tonnages transportables, mais les caractéristiques sont, au fond, restées les mêmes. La mise en service des *trains unitaires* ou *trains blocs* a permis de diminuer fortement les coûts de transport. Un exemple typique en est le train unitaire qui relie la mine de Tunnelton en Pennsylvanie à une centrale thermique située à Martin's Creek, dans le même État, à 635 km de distance.

Le train comprend une locomotive fournie par les chemins de fer et des wagons privés destinés uniquement au service de la navette. Le tarif est calculé d'après le volume. Il n'y a ni dételage, ni triage, ni pesage. Ce trajet s'effectue à grande vitesse. Les frais d'exploitation sont ainsi diminués grâce à l'augmentation du taux d'utilisation du matériel. La rotation rapide des wagons réduit le parc nécessaire et, partant, diminue les investissements. Cependant, pour assurer un chargement rapide, il faut prévoir des capacités de stockage et des trémies de chargement. Pour le déchargement des trains blocs, on utilise des wagons munis d'attelages rotatifs et un culbuteur, ou bien des wagons-trémies. On arrive ainsi à décharger en 20 minutes des convois de soixante-douze wagons de 91 tonnes chacun. Toutes ces opérations sont entièrement automatiques. A partir d'une tour de contrôle surplombant la trémie de déchargement, le chef de train commande la vitesse du convoi; au fur et à mesure que les wagons passent au-dessus de la trémie, les trapes sont ouvertes par un dispositif électrique qui signale également la fin de l'opération.

Les grands transporteurs de charbon mettent au point actuellement le train intégral qui consistera en section équivalente à trente wagons couplés de façon permanente en groupes de cinq à six avec un convoi moteur entre chaque section. Les convois moteurs sont télécommandés à partir de la tête du train. De tels convois sont prévus pour avoir une autonomie de combustible d'une semaine.

De par l'implantation d'usines grosses consommatrices d'énergie et d'eau le long des voies navigables (cimenteries, sidérurgies, papeteries, etc.), le transport du charbon par voie d'eau s'est développé. Les réseaux de navigation permettent d'utiliser les bateaux de grand tonnage et d'augmenter la vitesse du trafic. C'est la voie navigable qui constitue le moins onéreux des moyens d'acheminement de la mine au consommateur. Mais malheureusement, ceux-ci ne sont pas forcément reliés par un cours d'eau navigable.

Pour les produits de qualité supérieure, combustibles défumés et coke, on peut employer des conteneurs. L'avantage est d'éviter la dégradation du produit par le transport; cette technique permet également de regrouper à la mine toutes les opérations de pesage et d'accélérer les opérations de transbordement d'un wagon à l'autre, et donc d'améliorer la rotation du matériel roulant.

Nous avons déjà parlé du transport par carboduc qui représente une solution d'avenir. Cependant, il ne concerne que les exploitations où l'on peut utiliser des fines.

▶ *Page ci-contre, un super-tanker; la dispersion des zones de production et de consommation du pétrole implique le transport sur des distances importantes par grosses quantités; le commerce pétrolier maritime représente donc plus de 55 % en tonnage du commerce mondial total.*

En fait, il s'agit à chaque fois d'un cas d'espèce. Ainsi, on ne peut pas toujours profiter des investissements faits sur le réseau ferroviaire. Dans le cas de création d'une ligne nouvelle en terrain difficile, il est plus avantageux, même du seul point de vue des investissements, d'installer des carboducs.

Transport des combustibles nucléaires

Le transport des combustibles nucléaires comprend trois phases principales :

— Le transport du minerai à l'usine de fabrication des éléments combustibles.

— Le transport des éléments de combustibles au réacteur.

— Le transport des éléments de combustibles irradiés à l'usine de reconversion.

La première phase ne présente pas plus de difficultés que le transport en vrac de n'importe quel minerai. En revanche, pour les deux autres, il se pose des problèmes de sécurité à cause des risques d'irradiation. Il faut donc utiliser des conteneurs spéciaux. Par exemple, pour transporter 2,66 tonnes d'uranium, le conteneur a un poids de 47 tonnes.

Le coût de transport varie de 1 à 5 selon la phase à laquelle on se place.

Transport des combustibles liquides

Les transport massif des hydrocarbures liquides se fait par navires pétroliers ou par oléoducs.

L'outil de transport est spécifique, car le pétrole est un produit sale et dangereux. La dispersion des zones de production et de consommation implique que ces transports massifs s'effectuent sur de grandes distances. La distribution des produits finis se fait sur des distances plus courtes et utilise également les moyens classiques : voies fluviales, voies ferrées, routes.

Là, c'est la diversité des produits qui pose des problèmes. Il faut en effet ravitailler des marchés de faible importance unitaire en produits tantôt solides (bitume), tantôt liquides (fuel, essence), tantôt gazeux, ou liquéfiés artificiellement. Tous ces produits répondent à des spécifications strictes, et il n'est pas question de les transporter ou de les stocker dans les mêmes récipients, car ils se pollueraient.

En plus des navires et des oléoducs, sont utilisés les chalands, les wagons-citernes et les camions, seuls à permettre la distribution des produits au niveau du consommateur final.

Transport maritime

Le commerce pétrolier maritime représente plus de 55 % en tonnage du commerce mondial total. En 1975, le trafic pétrolier a porté sur plus de 1,5 milliard de tonnes. La capacité des navires était en juin 1976 de 300 millions de tonnes de port en lourd, auxquels il faut ajouter les 20 millions de tonnes des transporteurs mixtes et 45 millions de tonnes désarmées par suite de la crise que connaît actuellement le transport pétrolier.

Les investissements des compagnies pétrolières concernant les tankers correspondent pour 1974 à 8 900 millions de dollars, soit 19 % des investissements totaux.

Les États-Unis, bien que deuxième producteur mondial derrière l'U.R.S.S., importent plus de 300 millions de tonnes par an, soit environ 10 % de la production mondiale. Leur principal fournisseur est l'Amérique latine avec 114 millions de tonnes, puis le Moyen-Orient avec 57 millions de tonnes.

Pour le reste du monde il y a essentiellement deux blocs :

— Pour la consommation, l'Europe occidentale avec 626 millions de tonnes importées dont 70 % du Moyen-Orient, soit 23 % de la production mondiale, et le Japon avec 245 millions de tonnes importées.

— Pour la production, le Venezuela et le Moyen-Orient. Ce dernier exporte près de 34 % de la production mondiale.

Le transport maritime de produits finis ou semi-finis représente une part croissante du tonnage transporté : plus de 20 % en tonnage, mais seulement 10 % en tonnes-kilomètres.

Les distances à parcourir sont très grandes : 13 500 km entre le golfe Persique et les États-Unis ; 20 000 km entre


René Burri - Magnum

Rotterdam, port pétrolier de l'Europe du Nord et le golfe Persique en passant par le cap de Bonne-Espérance; 7 800 km entre Marseille et le golfe Persique en passant par le canal de Suez; 12 500 km entre le Japon et l'Arabie Saoudite.

Les routes maritimes étant très longues, les pétroliers combinent l'utilisation des navires avec celle des oléoducs; ainsi le réseau d'oléoducs construit à travers l'Irak, la Syrie et le Liban fait gagner dix-huit jours par rotation sur le trajet vers New York. On comprend ainsi l'intérêt que portent les États-Unis à la stabilité politique dans ces régions.

La flotte pétrolière

Le pétrole, il y a une centaine d'années, était transporté dans des fûts, puis dans des réservoirs en acier disposés dans la coque des navires. Ensuite, la coque servit elle-même de réservoir. La construction de bateaux en acier résolut définitivement le problème. De là vient le nom de *tanker*, qui dérive de *tank*, et qui signifie réservoir ou citerne.

C'est la Seconde Guerre mondiale, avec l'approvisionnement des armées en produits pétroliers, qui imposa la construction d'un nombre considérable de tankers. Les États-Unis lancèrent plus de cinq cents navires d'un modèle standard baptisé T2 dont certains sont encore en service. Des progrès techniques considérables ont été effectués dans ce domaine, notamment en ce qui concerne la construction d'unités de plus grande taille. Cette évolution s'est faite sous l'impulsion des chantiers japonais et suédois.

Les chantiers de Saint-Nazaire ont lancé en 1971 *l'Esso Bretagne*, premier d'une série de seize navires pétroliers de 255 000 tonnes de port en lourd. Actuellement, ils ont réalisé la construction de deux tankers de 540 000 tonnes de port en lourd pour la Shell. Ces bateaux ont 415 m de long et 63 m de large.

La flotte pétrolière mondiale double tous les huit ans. La capacité de construction des chantiers japonais est de plus de la moitié du tonnage mondial.

Les pétroliers des classes 200 000 et 300 000 tonnes représentent actuellement 46 % du tonnage; depuis la dernière guerre mondiale, on a assisté à une course au gigantisme. Actuellement, il y a un surplus de navires sur le marché qui, conjugué avec la crise pétrolière et la diminution du rythme des importations, provoque une crise grave.

Les bateaux suivent les lois du pays dont ils portent le pavillon. Or, les droits d'inscription et les taxes sur les navires ainsi que les charges sociales et les salaires des équipages sont beaucoup plus élevés aux États-Unis ou en Europe occidentale qu'au Liberia ou à Panama. C'est pourquoi un certain nombre d'armateurs de nationalité diverse, mais surtout grecque ou américaine, ont fait immatriculer leur flotte dans ces deux pays. Le pavillon libérien couvre plus de 21 % en tonnage de la flotte pétrolière.

Exploitation des navires

La spécialité du transport est telle que les taux de fret sont très sensibles à l'offre et à la demande. Seulement 35 % de la flotte appartient aux compagnies, la concurrence est donc très vive.

Actuellement, les taux de fret très bas ont conduit les armateurs à désarmer une partie de la flotte. Désarmer le navire permet de diminuer les frais de personnel, d'entretien, de réparations et d'assurances, que les taux actuels ne permettent pas de couvrir. En 1975, 17 % des navires ont été désarmés.

Bien que le prix de revient ait tendance à diminuer en raison inverse de la taille des pétroliers, il est formé de deux facteurs : le coût de construction et les charges d'exploitation.

Les prix de construction ont fortement diminué dans les années soixante grâce à l'effort des chantiers japonais, pour réaugmenter ces dernières années et baisser à nouveau à cause de la surproduction actuelle. L'augmentation de la taille permet de faire des économies d'acier et de gagner sur les puissances propulsives à installer. Le prix des moteurs est proportionnel à la puissance, c'est-à-dire à la racine carrée du tonnage environ. L'effet de taille s'estompe quand on passe à des capacités supérieures à 300 000 tonnes, car il y a là de nouvelles contraintes de construction concernant la rareté des cales sèches, le coût des appareils de sécurité, le double système de propulsion, etc. Le prix de revient au voyage se compose donc des amortissements et charges financières, frais d'exploitation, de port et de combustible.

Le poste des dépenses d'exploitation ramené à la tonne décroît très rapidement avec la taille des navires. Si les taux de fret sont bas, il pourra donc être plus avantageux pour les armateurs de désarmer leurs navires de petite et moyenne dimension. Pour les gros navires, les armateurs réduiront la vitesse, allongeront le temps de séjour dans les ports et étaleront les programmes de réparations et d'entretien.

Réduire la vitesse permet de faire des économies notables sur le combustible. La consommation varie comme le cube de la vitesse. Tant que les économies sur le combustible seront supérieures au montant du fret reçu pour la fraction supplémentaire d'un voyage qui aurait été effectué pendant le temps perdu, l'armateur aura intérêt à diminuer la vitesse. A l'inverse, quand les taux de fret sont élevés, il a intérêt à augmenter les vitesses pour améliorer la rotation des navires et ainsi amortir plus vite les investissements correspondant aux coûts de construction.

De plus, les affréteurs sont souvent liés par des contrats à long terme, donc ils ont intérêt à réduire la vitesse de la flotte affrétée et à profiter ainsi des taux de fret peu élevés sur le marché pour obtenir des tonnages à une somme inférieure au montant économisé sur les coûts. Une réduction de vitesse de 16 à 12 nœuds entraîne une économie d'environ la moitié du coût des soutes.

Le marché est très sensible à la fluctuation des taux de fret et à la concurrence très vive. La durée de vie technique est très grande. Cependant, les navires de petite taille capables de naviguer parfaitement seront remplacés par les navires plus grands. Dans le cas d'un 540 000 tonnes, la réduction des coûts est de 56 % à la tonne transportée par rapport à un pétrolier de 80 000 tonnes. La durée de vie économique est donc plus faible. On opère là des investissements anticipés très coûteux.

Ces investissements sont énormes. Le montant unitaire d'un navire de 300 000 tonnes de port en lourd est supérieur à 52 millions de dollars. Le taux d'assurance est très élevé : 1 % de la valeur pour les navires de 100 000 Tpl; 4 % pour les navires de 450 000 Tpl. L'assurance contre la pollution est prise par les compagnies pétrolières et les armateurs eux-mêmes.

Le plan Tovalop, qui regroupe 94 % de la flotte, rembourse un maximum de 10 millions de dollars par sinistre. Le plan Cristal, qui groupe 80 % de la flotte, ajoute une garantie supplémentaire maximale de 30 millions de dollars par sinistre. Les fonds sont versés par les participants au prorata des tonnages inscrits.

Sécurité et pollution

L'augmentation des tailles des navires entraîne un risque plus grand en cas de sinistre. Cependant, la probabilité des accidents diminue beaucoup. La plupart des accidents ont pour origine un abordage. L'augmentation des tailles diminue l'encombrement sur les routes maritimes. Après guerre, les tankers de type T2 transportaient 16 000 tonnes. Si l'on avait continué la fabrication de ces navires, il y aurait à l'heure actuelle quelque treize mille navires! Une raffinerie portuaire de 4,5 millions de tonnes par an nécessiterait le déchargement d'un T2 toutes les trente heures contre un navire de 540 000 tonnes, comme le *Batillus* de la Shell, tous les quarante-cinq jours.

Pour diminuer les conséquences en cas de sinistre, on procède au compartimentage de la cargaison. Le volume des citernes est réglementé pour limiter les quantités de produits susceptibles d'être répandues à la mer. Ainsi, sur les très grands navires pétroliers de 540 000 tonnes, les citernes de la partie avant, plus vulnérables, ont une capacité de 9 000 m^3 contre 17 000 m^3 pour les citernes latérales et à l'arrière. En revanche, sur les navires de 270 000 tonnes, la taille des citernes varie de 13 000 à 21 000 m^3.

Le corollaire de tout cela est une complexité accrue de manipulation de la cargaison, qui nécessite l'emploi de calculateurs.

Les dimensions, le poids et les vitesses entraînent un effet multiplicateur sur les sinistres et leurs conséquences; cependant, les gains de productivité réalisés permettent l'installation d'équipements évitant les risques de collision et d'échouement.

Les grands navires sont dotés d'éléments technologiques de sécurité très avancés. Le *Batillus*, par exemple, outre l'appareillage classique (deux compas gyroscopiques, deux gyropilotes, deux radars, etc.), est équipé d'un système anticollision géré par ordinateur et dont le but est de traiter les images radar en vue de prévenir les abordages. Pour éviter les accostages brutaux, le navire comporte un loch Doppler mesurant avec une grande précision les vitesses longitudinale et latérale. Le système de radiocommunication est très poussé. Le navire est relié au réseau télex mondial conçu pour assurer des liaisons fiables en toutes circonstances.

Le bâtiment est doté de deux groupes moteurs, de deux hélices et de deux gouvernails entièrement indépendants. De ce fait, le rayon de giration et la distance d'arrêt sont sensiblement égaux à ceux d'un navire de 250 000 tonnes. De plus, en cas d'avarie à l'une des machines, le navire peut continuer à naviguer et à être gouverné.

Les explosions et les incendies constituent les risques spécifiques des navires transporteurs d'hydrocarbures. Une étincelle, pouvant être causée par l'électricité statique qui se produit au cours du nettoyage des citernes, peut provoquer une explosion.

Pour éviter la formation d'atmosphères explosives, on utilise maintenant la *technique du gaz inerte*. Au fur et à mesure que le pétrole est déchargé, il est remplacé par un gaz contenant moins de 8 % d'oxygène. Il s'agit d'un gaz de combustion récupéré après épuration.

Cependant, il subsiste toujours un risque résiduel nécessitant la mise en œuvre de procédés de lutte antipollution.

La majeure partie des tonnages déversés dans la mer ne correspond pas à une pollution accidentelle. De tels rejets à proximité de nos côtes ne peuvent provenir d'un pétrolier transporteur de brut : les navires, pour naviguer, doivent remplir leurs citernes d'eau de ballast dont ils ne se débarrassent que dans les ports de chargement. La plupart des ports sont équipés d'installation de déballastage dont l'utilisation est obligatoire, en France notamment.

De plus, la quasi-totalité des navires-citernes est équipée de moyens de rétention à bord des hydrocarbures.

Les eaux de lavage des citernes sont refoulées dans les dernières citernes latérales dont les parois sont pourvues de serpentins de réchauffage ; le dernier mètre des eaux de ballast, dans lesquelles sont mélangés les hydrocarbures, est également refoulé vers les citernes de décantation.

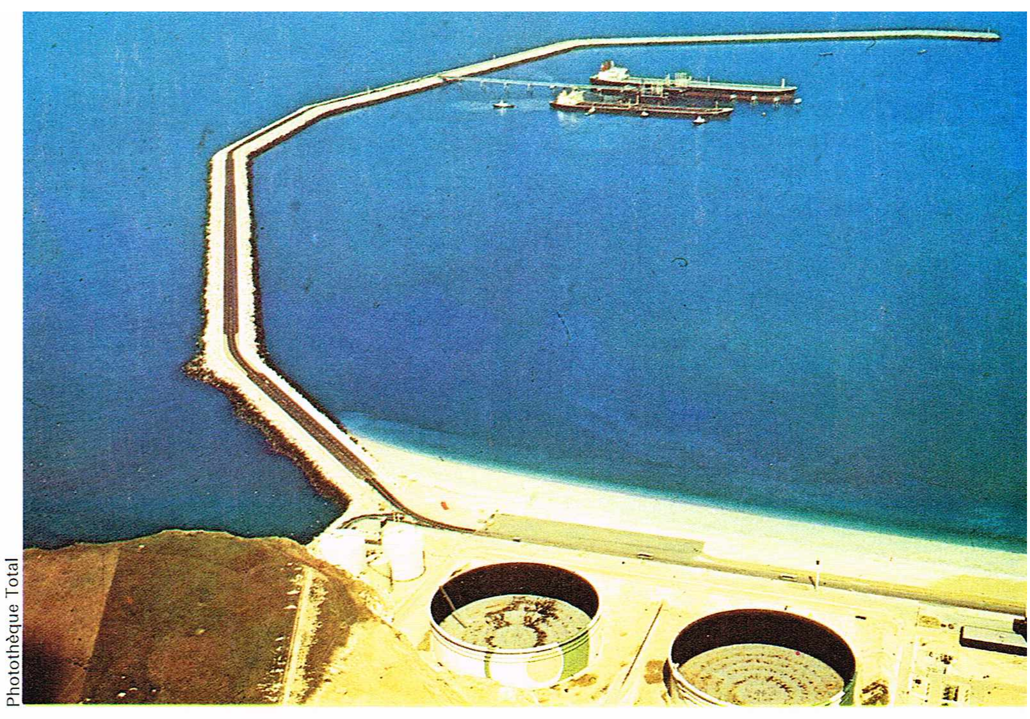
La décantation est facilitée par une élévation de température à environ 65 °C. Au fond de la citerne, on aura de l'eau pure sur laquelle flottent les hydrocarbures. Après détection de la surface de séparation, on pompe l'eau à un débit de plus en plus lent pour éviter le mélange. Il reste évidemment quelques tonnes d'eau. Mais il n'y a plus de risques de pollution. La cargaison suivante est tout simplement chargée sur ces résidus, d'où l'expression « load on top ». L'ensemble est déchargé en raffinerie.

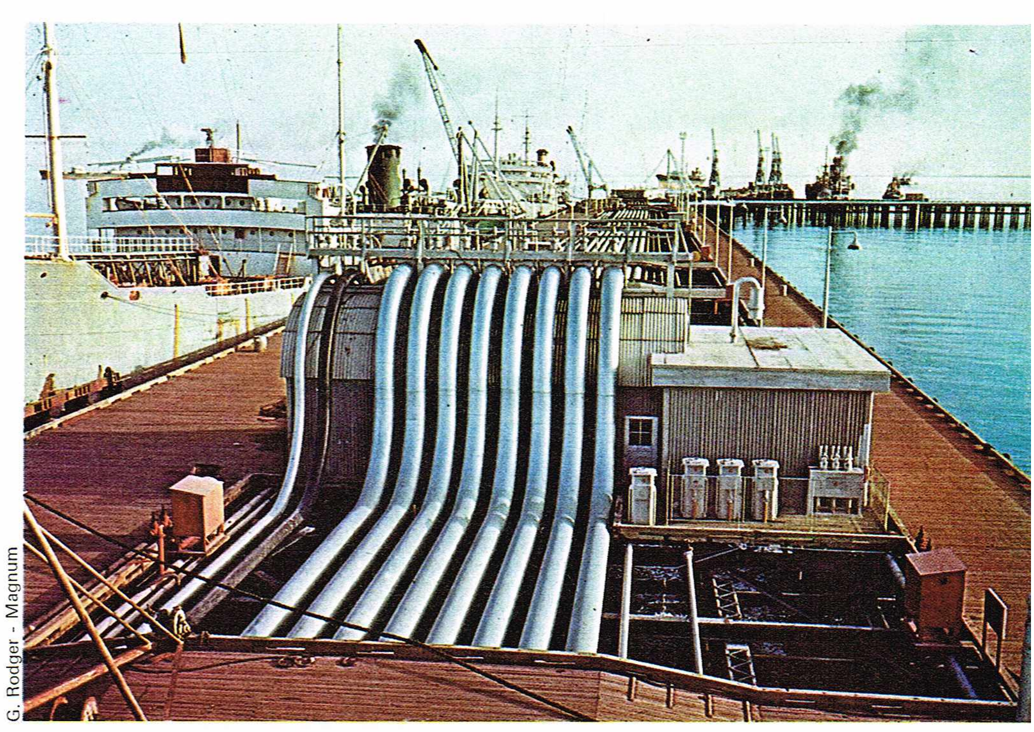
On fait grand bruit autour des sinistres maritimes entraînant une pollution par les hydrocarbures. Cependant, l'examen des statistiques 1975 confirme que l'actualité se nourrit d'exceptions : face aux trois mille cinq cent soixante-cinq navires-citernes en service l'an dernier et transportant quelque 250 millions de tonnes de pétrole brut, il y a eu dix-neuf cas de pollution dont trois seulement ont entraîné des conséquences sérieuses, deux par suite de collision (rejets de 2 000 et 7 000 tonnes respectivement), un par suite d'échouement (rejet de 3 600 tonnes).

Le gigantisme des pétroliers pose d'autres problèmes d'ordre technique. D'une part, les routes maritimes doivent permettre le passage de ces navires en toute sécurité. D'autre part, les ports de débarquement et d'embarquement doivent avoir eux-mêmes une taille suffisante, ainsi que des cales sèches de construction et d'entretien, lesquelles sont peu nombreuses. La plus grande est celle de Lisbonne, avec une capacité d'un million de tonnes.

Il n'existe que six ports de chargement permettant l'accès direct aux quais pour les pétroliers de 300 000 tonnes, dont cinq dans le golfe Persique, et une quinzaine de ports de déchargement, parmi lesquels le port d'Antifer au Havre.

Lorsque les profondeurs sont insuffisantes, il faut utiliser des bouées situées au large. Cette solution ne permet cependant pas d'opérer par tous les temps.


Photothèque Total


G. Rodger - Magnum

▲ ***En haut, le port de déchargement d'Antifer (Le Havre) le jour de l'inauguration ; au premier plan, les réservoirs ; au fond, deux super-tankers : l'Onyx, pétrolier de la C. N. P. et le Batillus de la Shell. En bas, la principale jetée du port d'embarquement de pétrole de la Koweït Oil Company à Mina'al-Ahmadi au Koweït.***

▼ ***Tableau I : longueur du réseau de pipe-lines en exploitation au début de 1975 (en milliers de kilomètres).***

Tableau I
Longueur du réseau de pipe-lines en exploitation au début de 1975 en milliers de kilomètres (d'après Omnium Technique des Transports par Pipe-lines)

Pays ou régions	Pétrole brut	Produits finis	Gaz naturel
États-Unis	122	123	400
Canada	20	5	33
Europe occidentale	11	9	75
U.R.S.S.	38	13	86
Total mondial	235	160	618

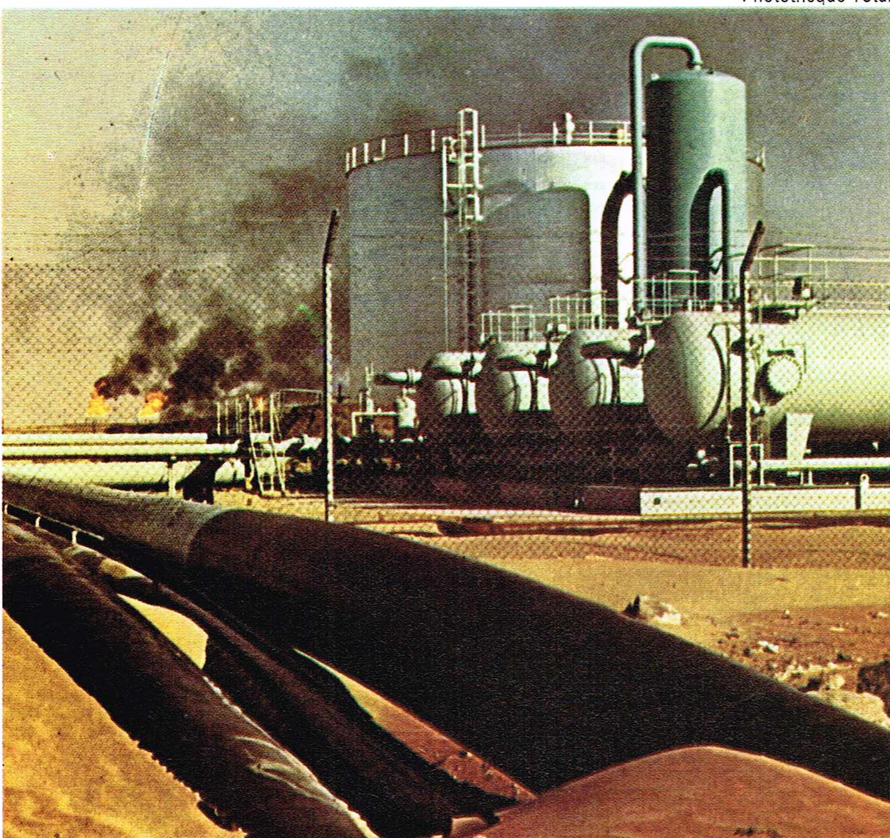
Tableau II
Principaux pipe-lines de pétrole brut en service au début de 1976 en Europe occidentale (d'après le Comité Professionnel du Pétrole)

Désignation	Longueur (en km)	Diamètre (en pouces)	Capacité ($\times 10^6$ t/an)
Wilhelmshaven-Cologne	389	28	24,5 (80)
2e ligne	244	40	20
Rotterdam-Francfort	479	36 et 24	23 (36)
Rotterdam-Anvers	105	34	28 (40)
Lavéra-Karlsruhe (Sud-Européen)	782	34	
2e ligne, Fos-Lyon	260	24	65 (90)
3e ligne, Fos-Lyon-Oberhoffen-sur-Moder	725	40	
Karlsruhe-Ingolstadt Neustadt	287	26	18 (20)
Gênes-Ingolstadt avec bretelle Ferrera-Aigle	931	26 à 12	50
Triestre-Ingolstadt	464	40	39 (54)
Würmlach-Vienne (bretelle du Triestre-Ingolstadt)	420	18	7,5 (10)
Le Havre-Valenciennes	285	12	3,5
Le Havre-Grandpuits	245	20	10,3
Malaga-Puertollano	267	16	
Forties-Cruden Bay (immergé)	185	32	12,5 (20)
Cruden Bay-Grangemouth	208	36	12,5 (20)
Ekofisk-Teesside (immergé)	355	34	15 (25)
Piper-Flotta (immergé)	210	30	12,5

▲ *Tableau II : principaux pipe-lines de pétrole brut en service au début de 1976 en Europe occidentale.*

▼ *Une station de pompage et de dégazage du pétrole brut à Bu Hasa 2 (principauté d'Abu Dhabi).*

Photothèque Total



Transport par pipe-lines

C'est aux États-Unis, en 1865, que fut utilisée pour la première fois une conduite pour évacuer la production d'un gisement.

A l'heure actuelle, plus d'un million de kilomètres de conduites sont installés dans le monde. La majeure partie (61 %) sert au transport du gaz naturel, le reste au transport du pétrole brut et des produits finis, sans compter les réseaux de collecte des gisements et ceux de distribution.

En 1974, la part des compagnies pétrolières dans les investissements totaux concernant les pipe-lines a été de 5 %, soit 2 460 millions de dollars. La majorité de ces dépenses (57 %) a été effectuée aux États-Unis. Près de 75 % du pétrole y sont transportés par pipe-lines.

Les grands réseaux de pipe-lines de pétrole brut

Aux États-Unis, les pipe-lines ont été essentiellement construits pour acheminer la production des gisements aux raffineries.

Ailleurs dans le monde, leurs principales fonctions sont : le transport du pétrole des gisements aux raffineries ou aux ports d'embarcation ; la diminution des trajets des navires pétroliers ; l'alimentation depuis les ports d'importation des raffineries intérieures.

Le réseau le plus dense est celui des États-Unis (120 000 km de conduites). L'U. R. S. S. vient au deuxième rang (38 000 km) [*tableau* I].

Dans les régions productrices, des pipe-lines ont été installés pour raccourcir les routes maritimes. Ce genre de pipe-lines dispose en fait d'une rente de situation ; dans cette hypothèse, la société gestionnaire peut fixer un tarif de transport relativement au-dessus de son prix de revient tout en procurant à l'utilisateur du pipe-line un avantage économique.

Le Sumed, entre Suez et Alexandrie, double le canal de Suez ; en outre, il concurrence le monopole du T. I. P. line d'Israël reliant la mer Rouge et la Méditerranée. Mais il semblerait que le comité des transports et des communications du Conseil égyptien fût plus favorable à une augmentation de la capacité du canal qu'à celle du pipe-line. Par le canal, des navires de 150 000 tonnes pourraient passer en pleine charge et ceux de 250 000 tonnes pourraient passer sur ballast.

Les oléoducs du Moyen-Orient permettent principalemet d'exporter une partie de la production vers la côte orientale de la Méditerranée, réduisant ainsi dans de fortes proportions la durée du voyage par mer. Le plus connu est le T. A. P. line *(Trans Arabian Pipe-line)* qui relie l'Arabie Saoudite au port de Sidon au Liban.

La sécurité politique est capitale pour la bonne exploitation des oléoducs. L'Irak par exemple a décidé la construction d'une conduite évitant le territoire syrien et débouchant au port de Dortyol en Turquie ; ce pays, de plus, a ouvert une conduite, le *Strategic Pipe-line,* qui relie les gisements du Nord à l'extrémité septentrionale du golfe Persique et peut fonctionner dans les deux sens, et a fermé l'oléoduc rejoignant Tripoli et Banias.

L'Iran, qui a également de nombreux problèmes avec l'Irak, a un projet similaire pour un pipe-line dont le tracé contourne soigneusement le territoire irakien, traverse la partie la plus montagneuse du Moyen-Orient, et aboutit à la côte turque de la Méditerranée.

Dans les pays consommateurs, les oléoducs relient les ports d'importation aux raffineries intérieures. Le développement des oléoducs est récent ; la première conduite importante a été posée en Europe en 1959. Le réseau se subdivise en deux systèmes importants (*tableau* II) :

— L'un, Nord-Sud, qui relie les ports de la mer du Nord à l'Allemagne et la Belgique.

— L'autre, Sud-Nord, qui relie les ports de la Méditerranée (Gênes, Trieste, Fos-sur-Mer) aux régions du centre de l'Europe.

Exploitation des oléoducs

Les investissements sont constitués des éléments suivants : l'étude du tracé, le matériel, l'installation, les stations de pompage, les télécommunications et les stockages.

Afin d'augmenter la capacité du pipe-line, il est possible d'installer des stations de pompage. Ainsi, la première conduite du pipe-line Sud-Européen est passée d'une capacité de 10 millions de tonnes par an avec trois stations de 5 000 chevaux à une capacité de 35 millions

de tonnes par an avec seize stations de 10 000 chevaux. Pour une capacité annuelle donnée, les investissements sont pratiquement proportionnels au diamètre. Le poids d'acier augmente plus vite que le diamètre, mais les dépenses d'installation augmentent plus lentement.

La capacité de la conduite peut être multipliée par quatre grâce à l'adjonction des stations de pompage. L'effet d'échelle pour un pipe-line est très prononcé, car cela correspond à un investissement supplémentaire de 25 %. Dans ces conditions, il est intéressant d'installer des conduites de gros diamètres, même si cela entraîne un suréquipement les premières années, pour pouvoir faire face à l'augmentation postérieure des besoins de transport.

Les dépenses d'investissement pour les conduites varient fortement avec les conditions géographiques; le rapport peut être de 1 à 20.

En mer, on utilise des barges spéciales halées sur des ancres. Les stations de pompage doivent être installées sur des plates-formes très coûteuses. On comprend dans ces conditions que l'évacuation de la production par conduites immergées ne peut être envisagée pour des gisements très éloignés des côtes que s'ils ont une production très élevée ou si plusieurs gisements sont reliés au même pipe-line (cas du golfe du Mexique). En mer, le coût de la conduite est en moyenne cinq fois plus élevé qu'à terre.

En Arctique, la technique du pipe-line est plus complexe, étant donné les différences de températures et les problèmes d'environnement. Le coût de la conduite allant de Prudhoe Bay à Valdez, en Alaska, est équivalent à celui d'une autoroute urbaine.

La consommation d'énergie pour vaincre les pertes de charge est inversement proportionnelle à la puissance cinquième du diamètre et fonction de la viscosité du pétrole transporté.

L'installation de stations de pompage supplémentaires augmente très rapidement les frais d'exploitation unitaires. Les investissements s'élèvent avec le diamètre et lui sont en première approximation proportionnels. Les frais d'exploitation diminuent considérablement quand le diamètre augmente; il y a donc un diamètre optimal des conduites à trouver en fonction des prévisions d'exploitation. Pour un pipe-line déjà construit, il existe un diamètre optimal lié à une puissance de pompage. La conduite doit transporter la quantité correspondant à ce débit, sous peine de voir le prix de revient unitaire augmenter sensiblement, puisque la plupart des dépenses sont des charges fixes.

Il y a donc une certaine rigidité économique d'exploitation à laquelle s'ajoutent les vulnérabilités des conduites aux modifications des circonstances politiques.

Distribution des hydrocarbures liquides

La distribution doit permettre la satisfaction des besoins des consommateurs. Les difficultés proviennent de la très grande dispersion géographique de ces derniers, ainsi que de la disparité des produits et des quantités à fournir. La grande variété des produits et la précision des spécifications font que l'aspect qualitatif de la distribution est une contrainte très importante au stade final du raffinage, pour le stockage, et aussi pour le transport afin d'éviter la pollution réciproque des produits livrés.

Le poids économique de la distribution dans l'économie de la chaîne pétrolière est considérable. Les frais d'exploitation sont plus élevés que pour les autres branches d'activité de la chaîne pétrolière. La part de la distribution dans le coût de la tonne de produits finis consommés est de 15 % en Europe, si l'on tient compte des impôts et taxes perçus dans les pays producteurs et le pays consommateur. Si l'on ne retient que les coûts techniques, elle passe à 60 % environ et le poids économique devient énorme.

Cette branche fait l'objet d'un effort pour augmenter la productivité et rationaliser la commercialisation. On peut constater une évolution importante dans les réseaux. Ainsi, les points de vente trop proches ou à faible débit ont été supprimés, le service à la clientèle amélioré. L'essence, qui avait commencé à être distribuée en bidons chez l'épicier, par une sorte de retour de l'histoire est maintenant vendue dans les supermarchés, et les stations-service se transforment en boutiques.

L'importance des fluctuations saisonnières est très forte.



Photo C.E.M.

▲ ***La barge ETPM 1601 en service en mer du Nord pour la pose de pipe-lines de gaz ou de pétrole; en mer, le coût d'une conduite est en moyenne cinq fois plus élevé qu'à terre.***

Près de 80 % des consommations se situent entre le 30e et le 60e parallèle de l'hémisphère Nord, ce qui revient à dire que presque tous les clients ont froid ou circulent davantage en même temps.

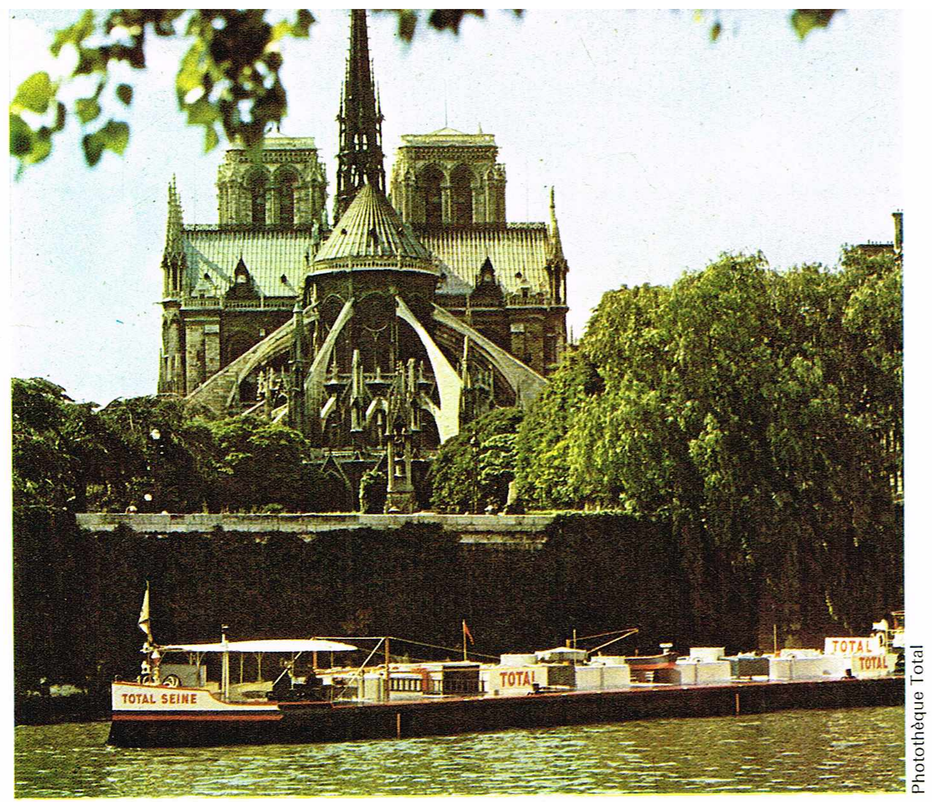
La station-service, qui joue un rôle important pour la publicité, ne représente que moins du quart des ventes et ne doit pas faire oublier les autres systèmes de distribution. La fiscalité à ce niveau est très lourde et complexe. Un bon impôt indirect doit frapper un objet de grande consommation qui ne soit pas considéré comme de première nécessité afin de ne pas toucher les très faibles revenus. De plus, la consommation par rapport au prix de vente doit être inélastique, pour que le poids relatif des taxes ne soit pas une incitation à moins consommer. La taxation des produits pétroliers remplit ces conditions et représente plus de 10 % des revenus de l'État. La cible de choix est l'essence bien que sa consommation ne corresponde pas toujours à une dépense de loisir, car l'automobile sert d'outil de travail également.

Le cadre juridique de la distribution est également complexe. Il porte sur deux domaines principaux : la

▼ ***Un exemple de transport particulier de produit fini, celui d'huile par gondole à Venise (Italie).***

Photothèque Total





Photothèque Total

▲ *Distribution de produits finis par péniche (devant Notre-Dame de Paris).*

réglementation de la concurrence, et la réglementation concernant la construction des stations-service ou des dépôts, liée à l'urbanisme, la sécurité, la pollution, etc.

Dans tous les pays consommateurs, il existe un système réglementant la concurrence. Il est très strict en ce qui concerne les stations-service. Ainsi, en France, la localisation et le nombre sont contrôlés par la Direction des carburants.

C'est le consommateur qui se rend aux points de vente dans le cas de la commercialisation des carburants. En revanche, pour distribuer le fuel domestique, ce sont les revendeurs ou les sociétés elles-mêmes qui livrent les clients. Pour les ventes de gaz liquéfiés, la vente se fait dans sa majorité par l'intermédiaire d'emballages consignés; les autres utilisateurs sont équipés de cuves.

La part consommée par les industries est importante. Elle correspond à 25 % des gaz liquéfiés, 100 % des carburéacteurs, 30 % du fuel domestique, 33 % du fuel lourd, 100 % des bitumes, 66 % des lubrifiants.

Transport des produits finis

Transport par pipe-lines

Les fluctuations saisonnières de la consommation entraînent que le débit moyen annuel d'un pipe-line de produits finis dépasse rarement 60 à 70 % de sa capacité théorique. Cela entraîne donc une augmentation du prix de revient unitaire. De plus, ce genre de pipe-line sert au transport de nombreux produits pétroliers, ce qui entraîne des zones de contamination qu'il faut éliminer. On essaie donc d'expédier à chaque fois les plus grosses quantités possibles de chaque produit et selon des séquences correctement choisies en fonction des caractéristiques des produits.

Certains produits doivent être réchauffés, compte tenu de leur viscosité et de leur point de congélation : c'est le cas du fuel lourd. Certains pipe-lines sont donc réservés à l'alimentation des gros dépôts dans les zones de forte consommation.

Transport par voies d'eau intérieures

C'est là le moyen de transport qui permet les frais d'exploitation les plus faibles. Les facilités de chargement des liquides permettent une automation poussée. Cependant, ce moyen de transport est lent et est donc rentable surtout pour les produits lourds de moindre valeur marchande.

Cependant, il faut pouvoir disposer d'un réseau de voies d'eau navigables étendu et interconnecté. Cet outil de transport, qui était remarquable en France sous la IIIe République, s'est dégradé depuis la guerre, car il n'est pas toujours adapté aux conditions de trafic de bateaux de grande taille. La solution consistant à utiliser des chalands, réservoirs flottants, et un engin propulseur permet une plus grande flexibilité d'exploitation. On utilise la partie motrice en pousseur pour diminuer la consommation d'énergie, car les remous de l'hélice ne viennent pas ralentir la marche des barges, comme dans le cas du remorquage.

Transport par voie ferrée

Près des trois quarts de ce transport correspondent à des mouvements depuis les raffineries ou les ports d'importation vers les dépôts de l'intérieur.

La voie ferrée est particulièrement bien adaptée au transport des gaz de pétrole liquéfiés. Pour ceux-ci, dans les canalisations, il y a des risques de formation de bouchons de vapeur; en ce qui concerne les voies d'eau, le coût des ruptures de charge qu'elles entraînent est prohibitif. Seules les citernes routières ou ferroviaires remplissent cette fonction d'une façon économique.

Pour transporter les produits à haut point de ramollissement, on utilise des wagons équipés d'un circuit de réchauffage raccordable extérieurement à un réseau vapeur basse pression, ou des wagons calorifugés. De plus, l'outil roulant est utilisé comme stockage mobile temporaire.

Cabotage

Il s'agit là du transport le long des côtes sur un court trajet et principalement pour des raisons géographiques. Les taux de fret varient beaucoup avec la régularité des affrètements.

Transport par route

Il s'agit du transport complémentaire des transports massifs. C'est le seul moyen utilisable au stade ultime de la distribution. Son coût est très élevé, mais la densité de l'infrastructure routière lui donne une grande souplesse.

Les sociétés pétrolières font de plus en plus appel à des firmes de location. De cette manière, elles évitent de gérer un parc de véhicules important, tout en conservant une politique de marque commerciale, car les contrats de location les autorisent à apposer leur sigle sur les véhicules.

Le transport routier est très réglementé, la fiscalité très complexe et les frais de personnel très lourds.

On trouvera sur le *tableau* III une comparaison quantitative entre les divers modes de transport utilisés pour les produits pétroliers en France.

La part des camions est très importante et s'est maintenue ces dernières années malgré le coût de transport élevé. Cela s'explique également par le développement des raffineries intérieures qui assurent dans leur zone de desserte des livraisons directes sans passer par l'intermédiaire de dépôts ravitaillés par fer ou par eau.

Pour les transports à longue distance et massifs, on utilisera de préférence les navires pétroliers et les oléoducs. La concurrence entre les divers modes de transport est limitée à l'intérieur de tranches délimitées en tonnage comme en distance.

En fait, les moyens de transport sont complémentaires et les aspects qualitatifs, financiers et les caractéristiques physiques du trajet sont des éléments importants du choix de l'outil de transport.

▼ *Tableau III : répartition des expéditions au départ des raffineries et des points d'importation (en 1975) selon les différents modes de transport.*

Tableau III

Répartition des expéditions au départ des raffineries et des points d'importation (en 1975) selon les différents modes de transports (d'après le Comité Professionnel du Pétrole)

Modes de transports	Tonnages (en milliers de tonnes)	Pourcentages	
Caboteurs	5 886	6,1	
Chalands	12 104	12,7	
Wagons	13 508	14,1	
Camions	33 430	34,9	
Pipe-lines	17 081	17,8	32,2
Canalisations directes *	13 742	14,4	
Total	95 751	100	

* Par « canalisations directes », on entend les canalisations de faible longueur reliant certaines raffineries à des entrepôts voisins, ou encore à des stockages de gros consommateurs, tel E. D. F.

Transport du gaz naturel

La part du gaz dans la satisfaction des besoins en énergie des pays gros consommateurs est très importante, comme nous l'avons déjà vu.

Le consommateur privé individuel y voit de nombreux avantages. Sous forme gazeuse, ce combustible ne demande aucune installation de vaporisation préalable à l'utilisation. Il est polyvalent et peut être utilisé aussi bien pour la cuisine que pour le chauffage. Il est immédiatement disponible et dans l'exacte quantité désirée. Il ne nécessite pas de stockage. Il est propre.

Ces mêmes avantages existent pour l'utilisation industrielle ; les plus importants sont alors l'absence de stockage et la simplicité plus grande des brûleurs. Mais, en plus, le gaz naturel permet de contrôler d'une façon précise les atmosphères réactionnelles. Ainsi, il trouve des débouchés spécifiques dans l'industrie chimique, pour certains procédés métallurgiques, de même dans l'industrie de la céramique et des verres.

Transport maritime

Comme pour le pétrole, il existe un déséquilibre entre les régions productrices et consommatrices. En dehors des États-Unis d'Amérique et de l'U. R. S. S. où l'équilibre des ressources et de l'utilisation est réalisé, les pays consommateurs sont l'Europe de l'Ouest et le Japon, alors que les pays producteurs sont l'Afrique, le Moyen-Orient et la région Asie du Sud-Est-Océanie. Le transport maritime s'impose donc.

Le volume spécifique du gaz est trop grand, et l'on doit passer par le biais de la liquéfaction pour rendre le transport du gaz compétitif par rapport à celui des hydrocarbures liquides. En effet, on peut dire que 1 000 m^3 de gaz naturel équivalent à 1 tonne de pétrole brut. Il y a donc un rapport de 1 à 1 000 entre les volumes de gaz naturel et de pétrole nécessaires pour fournir la même énergie.

Comprimer le gaz naturel n'est pas à ce niveau une solution envisageable, car il faudrait des pressions de l'ordre de 300 atmosphères. Dans ces conditions, le poids à vide des récipients susceptibles de résister aux contraintes mécaniques résultant de la pression interne serait trop important par rapport à la charge utile. Ce n'est pas le cas au niveau du consommateur final, car, sur de petites quantités et de courtes distances, le coût compte peu devant la nécessité d'avoir du gaz.

Pour réduire le volume du gaz naturel, on peut envisager une transformation chimique du gaz en un produit énergétique liquide dans les conditions normales de température et de pression. Le produit chimique qui réalise le plus facilement ces conditions est le méthanol. Cette transformation est à l'étude pour l'Arabie Saoudite, où l'on envisage la création d'unité géante de production de « methy fuel » (méthanol impur). Le produit serait ensuite expédié vers les États-Unis dans des pétroliers spécialement aménagés.

L'inconvénient du procédé est qu'il ne restitue au moment de l'utilisation finale qu'une partie de l'énergie primaire disponible au départ en raison des consommations intervenues aux différents stades de la transformation.

A pouvoir calorifique égal chez le consommateur final, le méthanol demande 50 % de plus de gaz naturel que le gaz naturel liquéfié (G. N. L.). D'autre part, le méthanol est un neurotoxique dangereux, et les risques de pollution en cas d'accident d'un navire seraient très graves.

C'est sous forme liquéfiée à — 160 °C, sous la pression atmosphérique, que l'on transporte le gaz naturel. A cette température, son volume est 600 fois plus petit et sa densité est environ la moitié de celle du pétrole brut. On atteint ainsi le seuil économique du pouvoir énergétique spécifique.

Cependant, le coût reste élevé, car on ne peut isoler le navire méthanier des asservissements technologiques que constitue une chaîne de liquéfaction. La manutention et le stockage à si basse température posent des problèmes technologiques spécifiques. Le prix d'un méthanier de 120 000 m^3 est presque le même que celui d'un pétrolier de 500 000 tonnes.

La chaîne de G. N. L. nécessite un ensemble intégré allant du champ jusqu'au réseau de gazoducs du pays consommateur, c'est-à-dire : un gazoduc allant des gisements jusqu'à la côte ; une usine de liquéfaction sur la côte ; un terminal d'expédition comprenant le port, les stockages et les installations de chargement ; une flotte de méthaniers ; un terminal de réception dans le pays d'arrivée ; une unité de regazéification.

Le commerce maritime a couvert en 1976 une capacité de 22,8 milliards environ de m^3/an, qui sera portée en 1985 à 247,3 milliards de m^3/an si tous les projets se réalisent. Cependant, il est nécessaire d'obtenir une étroite coordination technique entre les pays producteurs, les consommateurs et les sociétés qui travaillent au projet, pour ne pas voir des retards dans les plans de développement.

Plusieurs *procédés de liquéfaction* ont été successivement appliqués :

— A Arzew (Algérie) et à Kénaï (Alaska), chaque ligne de liquéfaction comporte trois circuits de réfrigération indépendants disposés en cascade utilisant comme fluide réfrigérant le propane, l'éthylène et le méthane. Le même souci qui a guidé le choix de ces trois fluides a conduit à ramifier chaque circuit en trois branches fonctionnant à des pressions et des températures différentes (les températures d'ébullition à la pression atmosphérique sont les suivantes : propane — 40 °C, éthylène — 104 °C, méthane — 161 °C).

— Une nouvelle technique, à cascade incorporée (Marsa el breja en Libye et Skikda en Algérie), utilise un fluide frigorigène unique qui est un mélange au sein duquel se condensent successivement, à des températures différentes mais sous la même pression, les phases liquides des constituants présents dans le gaz naturel à liquéfier.

— Un troisième procédé est envisagé qui fait précéder le cycle à fluide frigorigène unique par un cycle au propane permettant l'utilisation d'un compresseur centrifuge supplémentaire.

La deuxième technique permet de réduire les coûts de liquéfaction et de fabriquer des unités de plus grande taille, permettant ainsi des économies d'échelle importante.

En ce qui concerne les *méthaniers*, il y a deux techniques : celle des cuves autoporteuses et celle des cuves intégrées.

— Le procédé des cuves autoporteuses consiste à poser dans la cale du navire des réservoirs, parallélépipédiques ou cylindriques, qui sont donc indépendants de la structure du bateau. Ces réservoirs sont conçus pour supporter par eux-mêmes le poids de la cargaison ainsi que les efforts résultant des mouvements du navire. C'est avec ce type de navires qu'ont été installées les premières chaînes de liquéfaction.

Celle d'Arzew, près d'Oran, dont la capacité était de 1,5 milliard de m^3/an destinés pour 1/3 au Gaz de France et le reste à la Grande-Bretagne, avec 3 méthaniers, *Methane-Princess, Methane-Progress* et le *Jules-Verne*



Photothèque Total

▲ Le Hilli, méthanier de 297 m de longueur, peut transporter 125 000 m^3 de gaz liquéfié ; lancé en décembre 1976 par un consortium de compagnies pétrolières, il a été affrété pour une période de 20 ans sur le trajet Abu Dhabi-Japon. Ce navire a été construit suivant la technique des cuves-autoporteuses : en effet les réservoirs sont indépendants de la structure du bateau.

français. De même, les quatre méthaniers d'Esso destinés au trafic entre la Libye et l'Espagne sont de ce type.

Par la suite, des perfectionnements ont été apportés par Technigaz qui a conçu en 1970 des cuves autoporteuses sphériques et Gazocéan qui, en 1971, avec *l'Euclide,* a modifié le système de support et d'ancrage des sphères.

Les chantiers norvégiens réalisent la construction des sphères en série et en dehors du navire, ce qui représente une économie sur le prix du bateau.

— Les techniques dites à cuves intégrées utilisent la coque du navire. Celle-ci doit être capable de supporter la pression statique du liquide et les surcharges dynamiques dues aux mouvements de la cargaison. Les cuves intégrées peuvent comporter des membranes gaufrées, comme dans le *Pythagore* de Gazocéan, pour absorber les grandes variations de température, ou une membrane en métal particulièrement rigide. Cette technique permet une réduction sensible des quantités d'acier spécial et une meilleure utilisation du volume disponible, et représente une économie d'environ 20 % sur le coût du navire.

Comme dans le cas des navires pétroliers, on assiste à une augmentation de la taille des navires pour permettre une économie sur les coûts de transport. Cependant, la différence fondamentale réside dans le fait qu'il y a des pertes le long de la chaîne. Dans l'usine de liquéfaction, on utilise comme énergie une partie du gaz; cette autoconsommation est de l'ordre de 16 à 18 % de la quantité de G. N. L. produite. Les pertes du terminal sont négligeables, car elles sont récupérées et mélangées aux gaz d'émission. Par contre, sur les navires, la perte journalière est de l'ordre de 0,25 % de la capacité. Ce gaz peut être utilisé concurremment avec le fuel pour la propulsion du méthanier. La vitesse du navire est donc là un facteur important de l'économie du transport. Au niveau de la regazéification, on peut envisager de récupérer les frigories. Ainsi, à Fos-sur-Mer, la société Air-Liquide les utilise pour produire de l'azote et de l'oxygène liquides.

Transport terrestre

Le transport par conduites a pendant longtemps été le seul moyen de transport du gaz envisageable sur de longues distances. On mentionnera, à ce sujet, le projet Bechtel qui a fait l'objet d'études approfondies entre 1951 et 1955. Il s'agissait d'acheminer le gaz naturel du Moyen-Orient vers l'Europe. Le gazoduc devait avoir une longueur de 4 000 km, partir de l'Irak à travers la Turquie, la Grèce, la Yougoslavie, l'Autriche, l'Allemagne du Sud et atteindre le nord de la France. Ce projet a été abandonné par suite de la découverte de gisements plus proches en Algérie, en Libye, aux Pays-Bas et en mer du Nord, et de la mise au point des transports maritimes.

C'est surtout dans les pays consommateurs que l'on rencontre les grands réseaux de transport du gaz. Près des deux tiers des pipe-lines de gaz se trouvent dans le continent nord-américain, où ils forment un formidable réseau interconnecté sans soucis de frontières politiques. Ce réseau s'articule autour de quatre grands axes :

— Le Trans-Canada, long de 3 650 km, en 34 pouces de diamètre, sensiblement ouest-est, relie les régions productrices de l'Alberta aux centres consommateurs de la côte est du Canada et de la Nouvelle-Angleterre.

— Le Pacific Gas Transport, long de 2 246 km, en 36 pouces, alimente San Francisco à partir des mêmes gisements.

— Le Trans Continental, long de 3 975 km, en 30 et 42 pouces, relie le Texas à New York et à la région est des États-Unis.

— Le pipe-line d'El Paso, en 34 pouces, relie le sud des Millands à la Californie.

Des canalisations de plus faible diamètre assurent les interconnexions et la distribution au niveau du consommateur final. Les conduites de gaz sont systématiquement de diamètre supérieur à celles de pétrole.

La première raison tient à la tarification du gaz aux États-Unis, où la Federal Power Commission contrôle la politique gazière par l'intermédiaire d'un prix maximal à la commercialisation et non par les quantités produites comme pour les hydrocarbures liquides. Ainsi, des prix artificiellement bas ont conduit les exploitants à profiter au maximum des effets d'échelle en installant des canalisations aussi largement dimensionnées que possible et à ne desservir que de gros centres de consommation.

La deuxième raison est d'ordre technique. Le volume spécifique du gaz est très important et, pour véhiculer un même pouvoir calorifique, il faudra un volume plus grand de gaz naturel, et donc un débit plus fort.

Ainsi, pour deux conduites, l'une de gaz, l'autre de pétrole brut, fournissant chacune 900 milliards de thermies par an, celle de pétrole aura un diamètre de 120 cm et débitera 90 millions de tonnes par an avec une puissance de 30 000 kW, tandis que celle de gaz naturel aura un diamètre de 250 cm et débitera 100 milliards de m^3 par an avec une puissance de 100 000 kW.

L'investissement du gazoduc est deux fois et demie à trois fois supérieur à celui de l'oléoduc. Les dépenses d'exploitation sont trois fois plus importantes en raison du surplus de consommation d'énergie que le gaz naturel entraîne. Le transport du gaz naturel est donc deux fois et demie à trois fois plus élevé que celui du pétrole brut.

Les réseaux de transport du gaz en Europe sont très développés également. Leur infrastructure correspond à celle des réseaux traditionnels du gaz de ville, auxquels se rajoutent les réseaux modernes longue distance.

En France par exemple, le réseau s'organise à partir des gisements du Sud-Ouest vers le nord, puis à partir du gaz des Pays-Bas dans toute la moitié nord de la France, et enfin depuis les terminaux de gaz naturel liquéfié du Havre pour Paris et de Fos-sur-Mer pour la région lyonnaise.

Grands projets en cours

Le gaz est une énergie propre et c'est en outre la plus demandée, étant donné les besoins actuels d'énergie.

Les techniques d'évacuation de la production à partir de gisements marins à faible profondeur vers la côte semblent maîtrisées. Cependant, lorsqu'il s'agit de construire des conduites sur de longues distances, par exemple de l'Algérie vers l'Europe, les problèmes sont d'une tout autre dimension. Il y a des fosses marines à traverser et les techniques à l'étude varient selon la profondeur et la longueur du parcours envisagé.

Ainsi, pour le parcours passant par Gibraltar, la conduite marine n'aurait qu'une trentaine de kilomètres et reposerait sur un fond plat par 450 m de fond. Il suffirait alors de remorquer au fond de la mer un train de conduites préalablement assemblées à terre. C'est cette méthode par immersion simple qui a été employée en Grèce pour la pose d'une conduite de 13 km à 240 m de profondeur.

Dans les autres trajets, la fosse a 2 700 m de profondeur et la distance est de 200 km environ.

E. D. F.-G. D. F. fait des essais pour une nouvelle technique dite *en tension contrôlée*. Elle consiste à assembler à terre des éléments de 2 à 3 km de longueur. Les éléments sont munis de flotteurs et de bouées espacés d'environ 150 m les uns des autres, fixés à la conduite par des câbles de 15 m de long. Ainsi, la conduite ne serait presque plus assujettie aux mouvements de la houle. Un navire spécialement aménagé à cet effet assemblerait en mer les éléments de conduites en cours de pose au nouvel élément à poser.

Une autre méthode consiste à poser une conduite à flottabilité positive maintenue à une certaine profondeur par des câbles amarrés sur des corps morts placés au fond. Il s'agit du *procédé Segans*. Le gazoduc Algérie-Italie *via* la Tunisie et la Sicile comprendra deux tronçons sous-marins dont une partie correspond à plus de 400 m de profondeur.

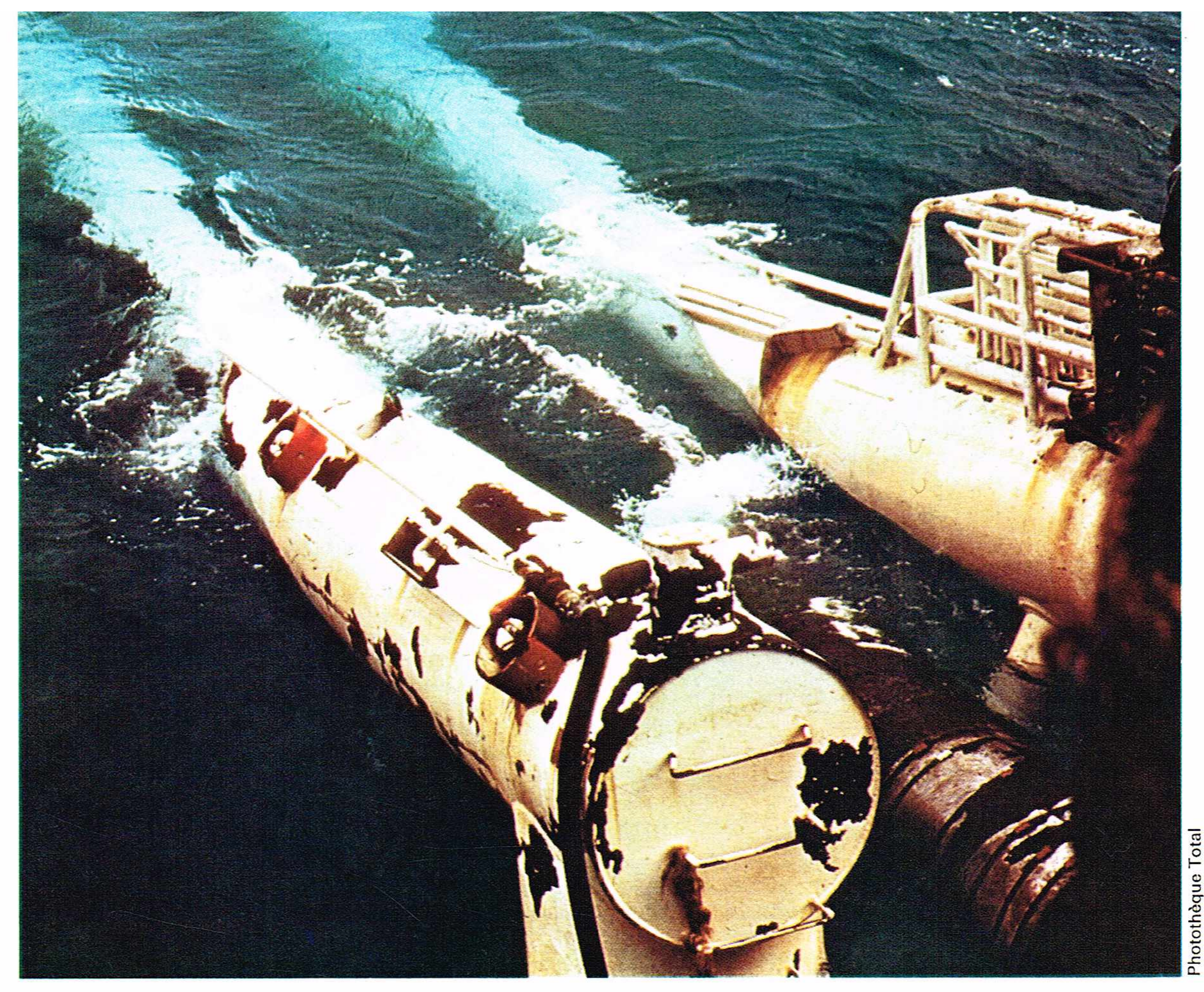
En Union soviétique, le projet *Aurore boréale* approvisionnera Leningrad et Arkangelsk à partir du gaz d'Oukhta avec des diamètres de conduite de 2 à 2,5 m et des débits de 20 milliards de mètres cubes par an.

Transport de l'hydrogène

Pour tourner le handicap du développement de l'énergie électrique à cause du coût de transport élevé, on peut utiliser un vecteur d'énergie à haut niveau sous forme chimique. Ce vecteur pourrait être l'hydrogène, qui peut être produit en quantité massive à partir de l'électrolyse de l'eau, la source d'électricité étant une centrale nucléaire. Une autre source est celle du charbon et des schistes.

** Production*

Les installations industrielles actuelles de 3 MW réalisent l'électrolyse en milieu alcalin à basse température.



Photothèque Total

◀ ***Construction de pipe-line pour le transport de gaz à partir de la plate-forme Frigg (mer du Nord). L'assemblage des différentes parties du pipe-line s'effectue en mer, à partir d'un appareil flottant, le stinger. Le contrôle de l'angle d'inclinaison du stinger, donc des canalisations qui iront ensuite reposer sur le fond de la mer, est réalisé par l'admission d'eau ou d'air comprimé dans les ballasts.***

Leur rendement est d'environ 60 %. L'énergie doit être fournie par un réacteur nucléaire, couplé à une turbine et un alternateur et à un redresseur pour produire le courant en continu. On améliore le rendement jusqu'à 72 % sans augmentation d'investissement spécifique en élevant la température et en réduisant les surtensions aux électrodes. Les cellules prototypes fonctionnent à 120 °C et sous une pression de 20 bars.

General Electric étudie un procédé avec des électrolytes solides (oxyde de zirconium) avec de la vapeur d'eau à 800 °C. Les rendements pourraient atteindre 75 à 80 %.

L'autre procédé de production d'hydrogène est la dissociation de l'eau à des températures de l'ordre de 1 000 °C. On utiliserait la chaleur produite par un réacteur nucléaire. Une cinquantaine de cycles sont à l'étude, dont les principaux sont fondés sur le bromure de calcium, le chlorure de fer, le chlorure de vanadium, l'oxyde de césium, le potassium. Les rendements seraient de l'ordre de 40 à 60 %.

Il semble qu'il faille attendre une vingtaine d'années avant de pouvoir envisager l'industrialisation de ces procédés.

* *Transport et stockage*

La température de combustion de l'hydrogène est de l'ordre de 2 045 °C, soit de 200 °C supérieure à celle du méthane, c'est donc un vecteur d'énergie calorifique à haut niveau. Le résultat de sa combustion est la vapeur d'eau ; aucune pollution n'est à craindre.

Cependant, si l'on considère qu'un gaz combustible se produit, se transporte et se vend en volume, force est de reconnaître que de tous les combustibles gazeux usuels l'hydrogène est le plus mauvais. Le rapport entre les pouvoirs calorifiques supérieur et inférieur est le plus élevé de tous les combustibles usuels. La faible densité implique qu'à pouvoir calorifique égal, il faut mettre en œuvre soit des volumes plus grands, soit des pressions plus élevées. Trois volumes d'hydrogène délivrent la même énergie qu'un volume de gaz naturel. Notons que la faible viscosité réduit les pertes de charge. Mais, de toute façon, les réseaux de distribution du gaz ne sont pas utilisables sans adaptation.

Il existe des réseaux de transport et de distribution de l'hydrogène en Allemagne fédérale dans la région de Dusseldorf-Essen, de même au Texas, qui desservent des complexes chimiques.

De plus, si l'hydrogène doit jouer un rôle important dans l'approvisionnement des ménages et des industries, il faudra construire des capacités de stockage. Les gazomètres classiques devront être trois fois plus gros à cause de la faible densité. On peut penser utiliser les stockages souterrains, mais *a priori* la grande diffusivité à travers les parois poreuses élimine l'utilisation de nombreux sites. Seuls les dômes de sel semblent être satisfaisants.

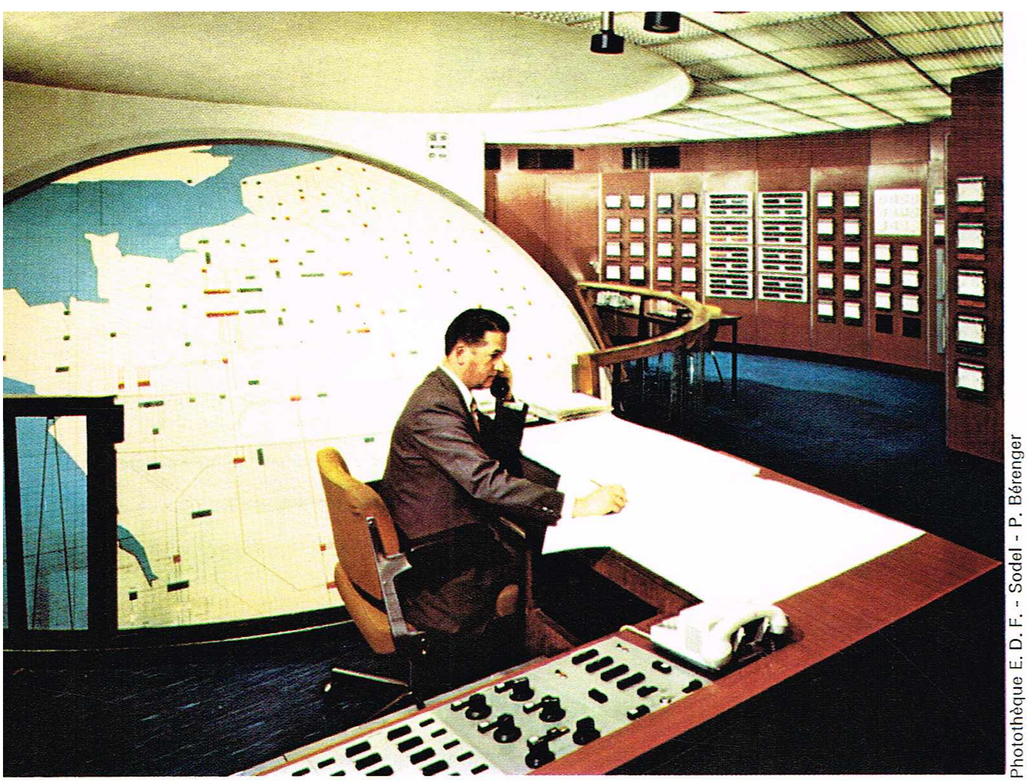
Une autre solution consiste à utiliser les hydrures métalliques et aboutit donc à un stockage sous forme solide. Ce procédé peut être très intéressant pour des usages spécifiques.

Les stockages sous forme liquide, s'ils sont techniquement réalisables, sont très coûteux. La N. A. S. A. utilise des sphères dont la capacité est de 5 000 m^3 pour stocker l'hydrogène liquide comme carburant des fusées. Cependant, le coût est trois fois supérieur à celui du stockage sous forme gazeuse et de plus le procédé est dangereux. En effet, l'hydrogène, contrairement à la plupart des autres gaz, s'échauffe lors de la détente. La moindre fuite d'un réservoir à hydrogène liquide peut conduire à une explosion. En revanche, l'hydrogène liquide est un bon carburéacteur. Son pouvoir calorifique est de 29 000 kcal/kg contre 10 500 kcal/kg pour les carburéacteurs classiques. Cependant, si l'on gagne les deux tiers en poids, les volumes de réservoir doivent être importants. La densité est 7,5 fois supérieure.

Les usages chimiques de l'hydrogène sont nombreux : synthèse de l'ammoniac, synthèse des produits pétrochimiques, conversion du charbon en gaz riche ou hydrocarbures lourds.

L'hydrogène peut également alimenter des piles à combustible. On étudie en outre la combustion catalytique qui éviterait la présence de flammes et de températures élevées pour certains usages. Il peut également être utilisé pour la réduction des minerais, notamment pour l'obtention d'éponge de fer. De plus, notons que, dans l'hypothèse de l'électrolyse, le sous-produit oxygène est tout à fait valorisable.

Mais il ne semble pas que le développement de l'hydrogène au stade industriel puisse se faire avant l'an 2000, car la technologie de sa production, de son transport, de son stockage et de son utilisation n'est pas encore maîtrisée. Mais c'est là un moyen de tourner le goulot d'étranglement du transport de l'énergie électrique sur de longues distances. D'autant que l'hydrogène peut parfaitement être utilisé en mélange avec d'autres gaz. Le gaz de ville est riche en hydrogène et a été employé pendant des décennies dans les réseaux urbains.



Photothèque E. D. F. - Sodel - P. Bérenger

▲ *Le réseau de l'Électricité de France est un réseau maillé composé de centrales de production reliées à des postes d'interconnexion qui alimentent des postes de répartition reliés aux réseaux de distribution ; ici, une vue du centre de dispatching national de l'E. D. F.*

Distribution de l'énergie électrique

Lignes - Réseaux

L'énergie électrique que nous consommons est distribuée par un très important et complexe réseau de transport. A l'amont se trouvent les usines génératrices qui transforment l'énergie primaire en énergie secondaire. L'énergie primaire est une énergie d'origine naturelle obtenue à partir de combustibles fossiles comme le gaz naturel, le charbon, le pétrole ou à partir des mouvements des marées, du vent, des chutes d'eau, ou encore à partir de la fission d'éléments radio-actifs contenus dans certains minerais.

L'énergie électrique est plus facile à répartir et à distribuer, mais elle ne peut être stockée qu'en très petite quantité et sous forme de courants continus seulement. Ceci nécessite une production constante vingt-quatre heures sur vingt-quatre pour satisfaire les usagers. Il est actuellement exceptionnel que la production se situe sur les lieux de la consommation.

Il y a quelques dizaines d'années, en revanche, les producteurs contruisaient les centrales au centre de gravité de la consommation. Quand de réels progrès furent réalisés dans le domaine du transport d'énergie, les centrales furent construites au plus près des centres d'extraction d'énergie primaire, et notamment dans les bassins houillers. Pour les centrales hydrauliques, il est évident qu'elles ne peuvent être construites que sur les lieux mêmes des chutes d'eau, loin, en général, des centres utilisateurs industriels et des agglomérations.

De la production à l'utilisation, l'énergie électrique est transportée par des lignes et des câbles; cet ensemble constitue un réseau. Le réseau de transport de l'Électricité de France est la portion du réseau national qui transite les grandes quantités d'énergie au départ des centrales jusqu'aux régions consommatrices.

Le réseau français est un réseau maillé dans lequel les unités de production sont interconnectées. Cette interconnexion est indispensable pour des soucis de sécurité, de fiabilité et d'économie. Les pointes de consommation ont lieu en des moments et en des endroits variables, ce qui nécessite des mouvements incessants d'énergie qu'il ne serait pas possible d'assurer sans l'interconnexion. La liaison aux réseaux étrangers permet un échange économique européen.

La meilleure solution pour transporter l'énergie électrique est le courant continu qui, pour les très grosses puissances et les grandes distances, résoudrait en partie les problèmes de stabilité. Mais on se heurte à plusieurs difficultés : la première est la transformation qui nécessite des stations comportant des mutateurs fonctionnant en redresseur ou en onduleur suivant le sens de transfert; la seconde est la réalisation de disjoncteurs à courant continu pour hautes tensions et grandes puissances du fait que le courant ne passe jamais par zéro.

Actuellement, presque tout le transport français se fait en courant triphasé de fréquence 50 Hz. Les hautes tensions les plus utilisées sont 225 kV, 380 kV, prochainement 736 kV et à long terme 1 000 kV.

Prescriptions administratives

Les distributions d'énergie électrique doivent satisfaire à des textes officiels relatifs aux conditions techniques pour la sécurité des personnes et des services publics qui sont publiés par l'U. T. E. (Union technique de l'électricité).

Ce sont des arrêtés ministériels du ministre du Développement industriel et scientifique qui ont été pris en accord avec le ministre de l'Équipement et du Logement, le ministre des Transports, le ministre des Postes et Télécommunications et après avis du Comité technique de l'électricité. Ils concernent les installations de distribution dans lesquelles on distingue les supports, les isolateurs et les conducteurs des lignes aériennes, ainsi que la résistance mécanique des ouvrages; les lignes souterraines; les postes et les sous-stations; les branchements particuliers; les traversées des cours d'eau, des plans d'eau et des canaux de navigation; le voisinage d'autres lignes ou de canalisations; le voisinage de chemin de fer; les mises à la terre; les caractéristiques des plaques de sécurité à placer sur les supports des lignes électriques.

Principes de base

Considérons un récepteur unique comprenant de la résistance, de l'inductance et de la capacité. Si nous appliquons la loi d'Ohm à ce récepteur, nous aurons l'équation suivante si la tension appliquée est $u = U_m \sin \omega t$

$$U_m \sin \omega t = L\frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C}\int i dt.$$

Si nous prenons le courant comme origine des phases $i = I_m \sin \omega t$, nous aurons :

$$U_m \sin(\omega t + \varphi) = L\omega I_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) + RI_m \sin \omega t + \frac{I_m}{C\omega}\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

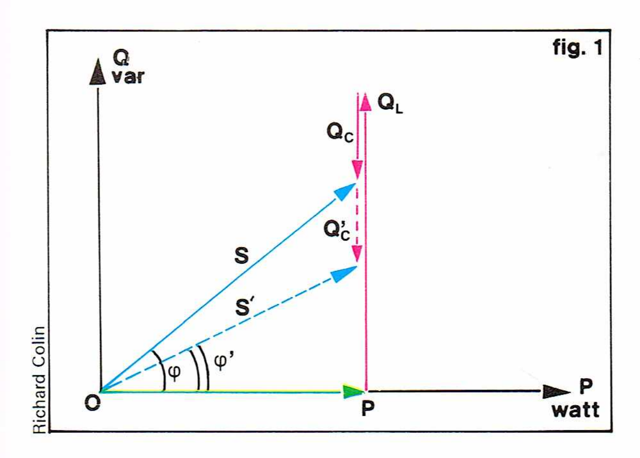
on en déduit : $U^2 = R^2I^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2 I^2$ et l'expression de la tangente de l'angle de déphasage entre U et I :

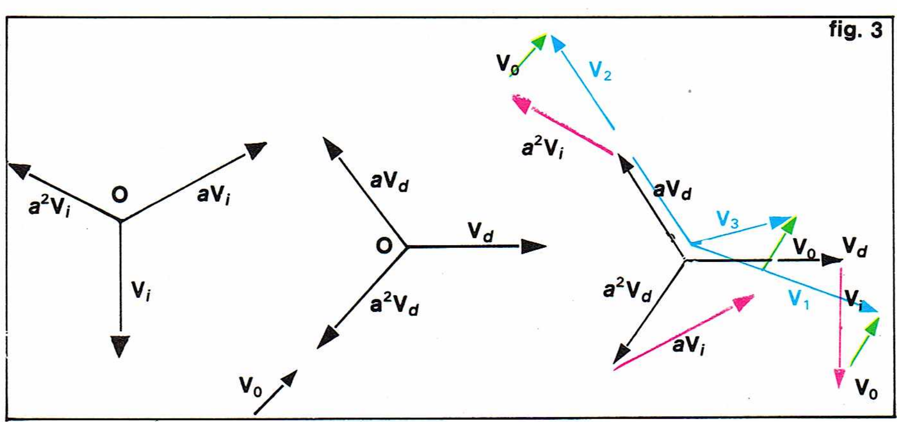
$$\text{tg}\,\varphi = \frac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{R}$$

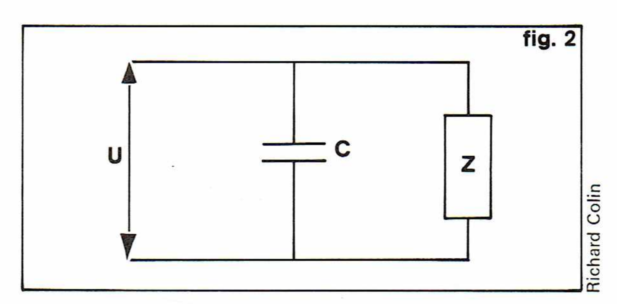
et du courant $I = \frac{U}{Z}$ avec $Z = \sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}$.

Indépendamment des utilisateurs, une ligne est un assemblage de circuits R, L, C. Elle a une résistance dont la valeur dépend de la qualité des matériaux employés, une inductance et une capacité par rapport au sol et par rapport aux conducteurs avoisinants. Ces caractéristiques sont génératrices de pertes actives et réactives; ces dernières sont d'autant plus élevées que le facteur de puissance est bas, d'où l'intérêt de le relever. Pour ce faire, il faut avoir des récepteurs à cos φ élevé. En effet, l'intensité sera d'autant plus élevée que le facteur de puissance sera faible à puissance active égale, $P = UI \cos \varphi$. Dans une ligne, la chute de tension est proportionnelle au courant; on voit donc l'intérêt de ne pas augmenter sa valeur à cause du cos φ.

Les producteurs d'électricité imposent aux abonnés industriels, sous peine de pénalisation, une valeur minimale. La solution la plus répandue est l'emploi de condensateurs statiques. Raisonnons sur un exemple simple. Considérons un récepteur ayant une impédance Z. La résistance absorbe une puissance active P, l'inductance absorbe une puissance réactive Q_L, la capacité restitue une puissance réactive Q_C (*fig.* 1). La droite qui joint l'origine 0 à l'extrémité du vecteur Q_C représente la puissance apparente S absorbée par l'appareil. L'angle formé par S et P est φ. Pour augmenter cos φ, il faut diminuer l'angle φ. Pour ce faire, on ajoute en parallèle avec Z une capacité (*fig.* 2). Elle fournira une puissance réactive Q_C' qui s'ajoutera à Q_C. Le résultat sera une puissance réactive absorbée plus faible, un angle sera une puissance réactive absorbée plus faible, un angle $\varphi' < \varphi$, d'où un cos φ' supérieur à cos φ. La puis-







sance réactive de ce condensateur sera $UI_C = C\omega U_2$, U étant la tension à ses bornes et ω la pulsation ($\omega = 2\pi f$).

Les producteurs utilisent, pour relever le facteur de puissance des réseaux, soit des condensateurs dont les puissances réactives sont limitées, soit des compensateurs synchrones qui sont des moteurs synchrones surexcités de puissance réactive beaucoup plus élevée.

Intensités dans les réseaux maillés

Tous les réseaux de distribution sont maillés. On appelle nœuds les points de liaison de trois ou plusieurs de ces lignes et branches les portions de circuit comprises entre deux nœuds voisins. Ces branches sont actives ou passives suivant qu'elles possèdent ou non des générateurs. Le calcul des intensités dans les branches est relativement simple quand leur nombre ne dépasse pas quelques unités ; par contre, dès que l'on atteint quelques dizaines et *a fortiori* un réseau national complet, les calculs sont fort complexes. Ces calculs se font par une méthode très connue : les lois de Kirchhoff (voir chapitre *Électricité*, p. 272).

Tensions des réseaux de transport

Nous avons vu que les usines de production n'étaient pas toujours situées sur les lieux de consommation. Le transport de l'énergie nécessite des lignes de très grandes longueurs, ce qui, malheureusement, engendre des chutes de tension en ligne et des pertes par effet Joule importantes. A puissance apparente égale S = UI, nous voyons que l'intensité sera d'autant plus faible que la tension sera élevée et dans le rapport $\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1}$. Cette faible intensité permet de diminuer les sections, donc les masses des conducteurs et les chutes de tension en ligne.

Fonctionnement en régime déséquilibré

Il est toujours préférable de fonctionner en régime équilibré ; c'est pourquoi les responsables de la distribution de l'énergie électrique répartissent au mieux les charges de la clientèle sur les phases des réseaux de distribution. Actuellement, presque tout le réseau français est en triphasé. Les consommateurs industriels utilisent simultanément les trois phases en alimentant des moteurs, des fours, des cuves à électrolyse ; le petit outillage et l'éclairage, alimentés en monophasé, sont branchés régulièrement sur chacune des phases. Les consommateurs domestiques utilisent rarement les trois phases, d'autant plus qu'elles ne sont pas toujours distribuées chez les abonnés. Il est donc courant dans ce cas de fonctionner en régime légèrement déséquilibré. Les consommateurs industriels ne sont pas à l'abri de ce phénomène si un défaut apparaît sur une des phases ; alors le déséquilibre est important. Ce déséquilibre est traduit par la représentation vectorielle suivante : le système polyphasé de vecteurs représentant les grandeurs sinusoïdales est composé de vecteurs qui n'ont pas le même module et qui sont déphasés l'un par rapport à l'autre d'un angle différent.

L'étude de tels systèmes peut être faite directement par la méthode vectorielle ou symbolique ou indirectement par la méthode des composantes symétriques. Le problème est de déterminer les courants et les tensions dans chaque phase du générateur ou du récepteur et dans le fil neutre suivant les couplages utilisés. La méthode des composantes symétriques, couramment employée, est fondée sur le théorème fondamental : un système de trois vecteurs quelconques peut être décomposé en trois systèmes de vecteurs symétriques : un système direct, un système inverse et un système homopolaire.

Si V_1, V_2 et V_3 sont les vecteurs réels du système déséquilibré (*fig.* 3), les vecteurs direct, inverse et homopolaire sont donnés par les expressions :

$$V_d = 1/3\ (V_1 + a^2V_2 + aV_3) \qquad V_i = 1/3\ (V_1 + aV_2 + a^2V_3)$$
$$V_0 = 1/3\ (V_1 + V_2 + V_3)$$

et les vecteurs réels par les expressions :

$$V_1 = V_d + V_i + V_0 \qquad V_2 = aV_d + a^2V_i + V_0$$
$$V_3 = a^2V_d + aV_i + V_0$$

dans lesquelles l'opérateur *a* est égal à :

$$\bar{a} = e^{j\ 2\pi/3} = \cos 2\ \pi/3 + j \sin 2\ \pi/3 = -0{,}5 + j\ \sqrt{3}/2$$

Reconstituons les vecteurs V_1, V_2 et V_3 à partir des trois systèmes en appliquant les relations de ces vecteurs en fonction de V_d, V_i et V_0.

Pertes par effet Joule

Les conducteurs, traversés par un courant, produisent une quantité de chaleur conformément à la loi de Joule. Si *i* est l'intensité à l'instant *t* d'un courant alternatif passant dans une résistance R, pendant un intervalle de temps *dt* infiniment petit, on peut considérer que *i* est constant et écrire $dW = Ri^2dt$. La somme de ces *d*W correspond aux pertes calorifiques. Le calcul se fait avec l'intensité efficace qui est définie de la manière suivante : l'intensité efficace I_{eff} d'un courant alternatif est l'intensité du courant continu qui, pendant une période T, cède à une même résistance R la même quantité de chaleur que le courant alternatif.

$$RI^2_{eff}T = \int_0^T Ri^2dt \quad \text{soit} \quad I^2_{eff} = \frac{1}{T}\int_0^T i^2dt.$$

Ce phénomène physique a pour origine l'augmentation de l'agitation moléculaire où un mouvement coordonné dû à la force électrique exercée par le champ se superpose au mouvement désordonné des électrons. Le nombre de chocs entre électrons et atomes ou ions augmente. Or, l'énergie de cette agitation est proportionnelle à la température du corps. Le résultat se traduit par un échauffement du conducteur.

Choix du nombre de phases

Un système monophasé, de tension efficace V et d'intensité efficace I, permet de transporter une puissance

◀▲ ***Figure 1 :** représentation de la puissance apparente* **S** *absorbée par un récepteur ayant une impédance* **Z.** **S'** *= puissance apparente absorbée par un récepteur du même type que le précédent auquel on a ajouté, en parallèle avec* **Z**, *une capacité (récepteur schématisé sur la figure 2).*
***Figure 3 :** méthode des composantes symétriques. Représentation des trois systèmes de vecteurs symétriques : direct (V_d), inverse (V_i), homopolaire (V_0), et reconstitution à partir de ces trois systèmes des vecteurs réels* V_1, V_2 *et* V_3

▶ *Figure 4 : a) montage côte à côte de trois systèmes monophasés semblables ; la puissance transportée est égale à trois fois celle d'un système ; b) assemblage des trois conducteurs centraux pour n'en faire qu'un ; si le système est équilibré, la composante homopolaire du courant est nulle et ce conducteur de retour (fil neutre) ne sera traversé par aucun courant et il sera possible de le supprimer.*

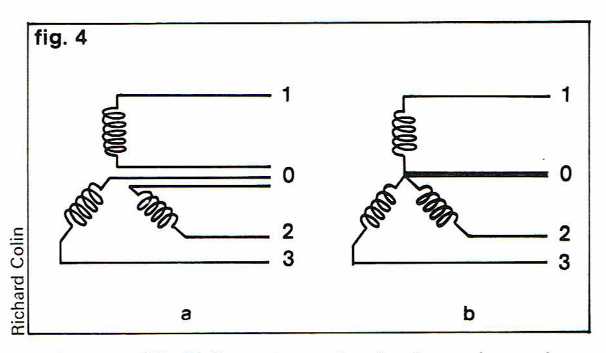


Figure 5 : réseau de distribution électrique du type radial simple.

fig. 5
transformateur BT MT
transfo MT/BT
MT
MT
poste HT/MT
HT
Richard Colin

active p = VI. Si l'on place côte à côte trois systèmes monophasés, on aura un montage à six conducteurs et une puissance transportée égale à $P = 3p = 3$ VI. Le même montage peut se faire avec n phases ; dans ce cas, la puissance est égale à np.

On peut assembler les trois conducteurs centraux 0 pour n'en faire qu'un (*fig.* 4). Quelle sera la section de ce conducteur ? Si le système est équilibré, la composante homopolaire du courant est nulle, donc ce conducteur de retour (appelé fil neutre) ne sera traversé par aucun courant et il serait possible de le supprimer. Le même raisonnement peut être fait avec un montage en triangle. L'emploi des courants polyphasés entraîne un gain économique évident par rapport au monophasé.

Le système polyphasé le plus utilisé, aussi bien pour le transport que pour la consommation, est le système triphasé. Le système hexaphasé est rarement transporté, mais il est couramment employé pour redresser les courants. Entre autres avantages, les courants polyphasés créent des champs tournants dans les enroulements statoriques des moteurs qui permettent des démarrages sans artifices contrairement au monophasé.

Fil neutre dans les réseaux de distribution

Les réseaux de distribution basse tension sans fil neutre présentent plus d'inconvénients que d'avantages. Prenons l'exemple courant de l'éclairage. La tension triphasée, entre phases, est 380 V. Le montage adopté avec des lampes 220 volts ne peut être que l'étoile, en effet $380/\sqrt{3} = 220$ volts. Si l'on éteint l'une d'elles, les deux autres seront en série sur 380 V, donc alimentées chacune sous une tension $380/2 = 190$ volts ; elles seront sous-voltées. Si maintenant on éteint l'une de ces deux lampes, on coupe le circuit et la deuxième s'éteindra. Si les trois lampes ont des puissances différentes, le point neutre artificiel ne se situe plus au centre de gravité du triangle équilatéral correspondant aux tensions composées ; les tensions seront différentes aux bornes des trois lampes.

Si le réseau comporte un fil neutre, le point 0 fixe le potentiel par rapport aux sommets du triangle précédent. Les tensions simples seront équilibrées. Le consommateur aura à sa disposition deux tensions, celle entre phases, U, et celle entre phase et neutre, $U/\sqrt{3}$.

Schéma général d'un réseau

Un réseau, à l'échelle nationale, se compose de centrales de production reliées à des postes d'interconnexion, eux-mêmes alimentant des postes de répartition reliés aux réseaux de distribution. Suivant la puissance souscrite par les consommateurs, leur branchement se fait directement en basse tension sur le réseau général, ou par l'intermédiaire d'un poste de transformation particulier appelé poste d'abonné, ou directement en moyenne tension. Ces configurations sont courantes dans les centres urbains ; par contre, dans les milieux ruraux, où les distances entre points desservis sont importantes, on adopte des solutions différentes : les lignes sont aériennes avec supports béton, en basse tension ou moyenne tension avec transformateurs sur poteaux.

En zone urbaine, le câble remplace la ligne aérienne, et le plus souvent le réseau est maillé pour assurer une sécurité d'alimentation. Ces câbles sont placés en tranchées ou en galeries ; les postes de transformation 20 kV/380-220 V sont le plus souvent souterrains, quelquefois construits en bord de rue ou dans les immeubles. La fréquence est 50 Hz. Pour mémoire, on peut rappeler que le réseau continu a pratiquement disparu ; de même, les distributions à 25 Hz du sud-est de la France.

Modèles de réseaux

Suivant les fonctions, on peut distinguer diverses structures de réseaux.

* *Réseau radial simple*

C'est le plus facile à mettre en œuvre et le plus économique. Il est le plus souvent utilisé pour des lignes aériennes moyenne tension et basse tension. A partir d'un poste haute tension/moyenne tension, partent en antenne des lignes qui vont alimenter des postes MT/BT ou des transformateurs sur poteaux (*fig.* 5). De ces derniers postes partent en antenne des lignes aériennes BT vers les abonnés. Ce modèle n'étant pas bouclé, une coupure de la ligne entraîne un arrêt de l'alimentation des abonnés, mais, sur les lignes aériennes, les défauts sont facilement localisables et les durées de réparation courtes.

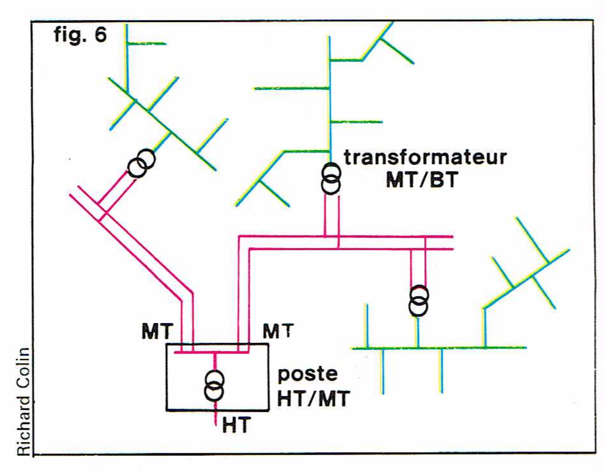
* *Réseau radial double*

Comme pour le précédent, la configuration est en antenne, mais il y a deux conducteurs côte à côte au lieu d'un du côté MT et un du côté BT (*fig.* 6). Ce type de réseau est rarement employé en lignes aériennes, mais plus souvent en câbles souterrains où les durées de localisation des défauts et de réparation sont relativement longues. Un seul câble est en service, l'autre est en réserve et raccordé sous tension. En cas d'incident sur le câble en service, il est débranché et remplacé par le second.

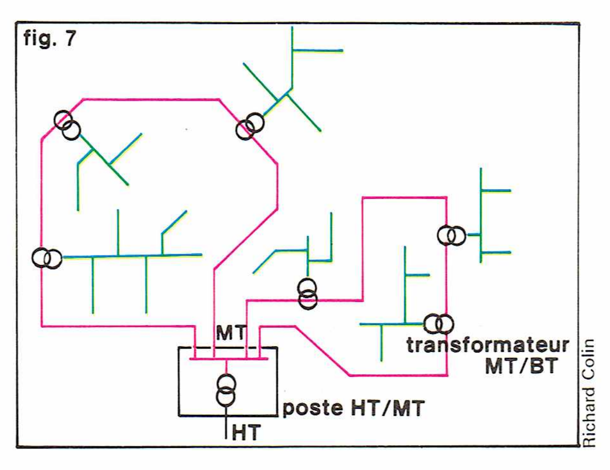
* *Réseau bouclé côté moyenne tension et radial côté basse tension*

Du poste de transformation HT/MT partent des séries de deux conducteurs reliés à leurs extrémités qui forment des boucles. Les postes MT/BT sont branchés sur ces boucles, les liaisons BT partent en antenne vers les abonnés (*fig.* 7). En cas de défaut sur un conducteur MT, on l'isole à partir des postes les plus proches, ces derniers étant toujours alimentés par l'autre côté de la boucle. Contrairement au cas précédent où un câble était en attente, ici toutes les liaisons transitent de l'énergie. Cette solution est plus satisfaisante économiquement et offre toute sécurité aux abonnés.

En zone urbaine, on place sous trottoir ou dans les immeubles des boîtes de jonction BT sur lesquelles sont branchés des conducteurs provenant de boucles différentes. En cas d'avarie grave, on peut faire la transposition d'une boucle sur l'autre.



▶ *Figure 6 : réseau de distribution électrique du type radial double.*



◀ *Figure 7 : réseau de distribution électrique du type bouclé côté moyenne tension, et radial côté basse tension.*

* *Réseau radial multiple côté moyenne tension et bouclé côté basse tension*

Du poste transformation HT/MT part une série de canalisations sur lesquelles sont branchés les postes MT/BT, soit sur une seule d'entre elles, soit sur deux. Le réseau BT est entièrement maillé et alimenté par les postes MT/BT branchés en parallèle. Si un incident se produit sur une liaison MT ou dans un poste MT/BT, les autres postes prennent une surcharge temporaire. De même, côté BT, si un défaut apparaît sur une de ses liaisons, l'alimentation est assurée par les autres. Avec un bouclage aussi poussé, une inversion de transfert de puissance n'est pas exclue. Pour s'en protéger, on place des relais de retour de puissance.

Ce type de réseau assure une excellente continuité de service et une tension pratiquement constante, quel que soit le lieu de branchement. Par contre, le maillage lui donne une faible impédance et des courants de court-circuit importants, c'est pourquoi il est nécessaire de placer régulièrement des fusibles aux boîtes de jonction des abonnés, aux boîtes de dérivation des nœuds du réseau et aux départs des postes. Cette solution a un coût d'investissement élevé et des frais d'entretien importants, c'est pourquoi on ne l'emploie que dans les grandes villes.

Distribution

L'utilisation de l'énergie peut se faire en branchant les récepteurs en série ou en parallèle. Dans le premier cas, l'intensité qui traverse les appareils est la même, par contre les tensions à leurs bornes sont fonction de leur impédance. Dans le second cas, la tension aux bornes des appareils est la même pour tous, mais les intensités sont différentes et fonction de l'impédance. La distribution série est pratiquement abandonnée. Quelques installations d'éclairage l'utilisent encore, où les lampes sont montées en série. Quelquefois, ces dernières sont alimentées sous tension constante par des transformateurs montés en série.

Actuellement, la distribution parallèle est la seule employée. Elle assure une fourniture à tension constante. Les modèles de réseaux précédents sont tous fondés sur une distribution de ce type.

* *Distribution de courant continu*

Courant continu 2 fils. Le réseau est alimenté par une source à tension constante qui peut être une batterie d'accumulateurs, un générateur tournant, etc.

Courant continu 3 fils. Le réseau est alimenté par deux sources de tensions identiques ou différentes montées en série (*fig.* 8). Les conducteurs partent des bornes de ces sources. Cette solution permet de distribuer trois tensions différentes si besoin est. Les appareils de forte puissance sont montés en haute tension entre les fils extrêmes ; le petit appareillage et l'éclairage sont montés entre le fil et un fil extrême. Le conducteur neutre est parcouru par une intensité égale à la différence des intensités qui parcourent les conducteurs extrêmes, c'est pourquoi la section de ce fil est plus faible que celle des autres, en général le tiers ou la moitié. On utilise quelquefois un autre montage. Les deux génératrices précédentes sont montées sur le même arbre, et leurs excitations sont branchées entre les conducteurs extrêmes et de telle manière que la moins chargée fonctionne en moteur et entraîne l'autre qui fonctionne en génératrice. Une génératrice principale est toujours reliée aux conducteurs extrêmes.

Courant continu 5 fils. Comme dans le montage précédent, une génératrice principale alimente en haute tension les conducteurs extrêmes. Des tensions intermédiaires sont obtenues par quatre générateurs branchés en série et sur le même arbre. Suivant les charges, chaque machine fonctionne en moteur et en générateur. On obtient de cette manière une régulation automatique (*fig.* 9).

* *Distribution de courant alternatif*

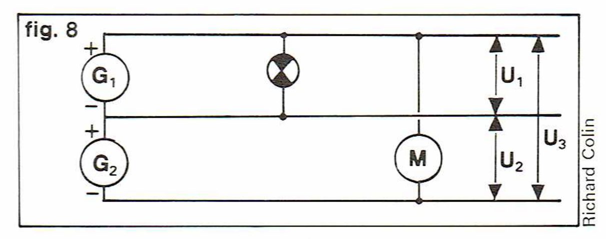
Courant monophasé à deux ou trois fils. C'est une alimentation destinée principalement aux usages domestiques où l'on utilise de faibles puissances et dans laquelle les moteurs sont universels ou asynchrones. On obtient du monophasé trois fils en branchant un transformateur dont le circuit secondaire a un point milieu qui permet de diviser par deux la tension (*fig.* 10).

Courant triphasé. Un système triphasé peut être distribué avec trois ou quatre conducteurs. Dans le premier cas, il y a trois conducteurs de phases et un conducteur neutre. Le rapport entre les tensions entre phases ou tensions composées et les tensions entre phases et neutre ou tensions simples est $\sqrt{3}$. C'est pourquoi les valeurs les plus utilisées sont 220/380 V qui ont pratiquement remplacé le 127/220 V. La distribution trois fils se fait avec un secondaire de transformateur d'alimentation branché en triangle ou en étoile neutre non sorti ; dans ce cas, il n'y a pas de tension simple, sauf si l'utilisateur fait un neutre artificiel ou branche les appareils en étoile. La distribution quatre fils se fait avec un secondaire en étoile neutre sorti.

Courant diphasé. Ce système se compose de deux tensions monophasées déphasées de $\pi/2$. Dans les distributions trois fils, on relie deux phases. Dans les distributions quatre fils, on relie les points milieux des deux phases sans neutre sorti. Dans les distributions cinq fils, le montage est le même que le précédent, mais le neutre est sorti.

Fonctionnement du réseau de transport

Un réseau de transport est un ensemble maillé dont le fonctionnement est extrêmement complexe. Il faut en effet conserver une fréquence quasi constante en fonction de la charge, assurer des répartitions de charges actives et réactives, des réglages de tension et le maintien du synchronisme des centrales. Ces quelques points, non exhaustifs, sont difficiles à satisfaire en période de déséquilibre entraînant des régimes transitoires. Le retour en régime normal stable n'en est pas moins complexe.



◀ *Figure 8 : distribution de courant continu par un réseau de 3 fils, alimenté par deux sources de tension G_1 et G_2.*

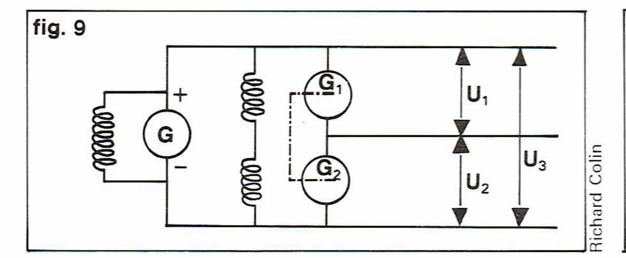
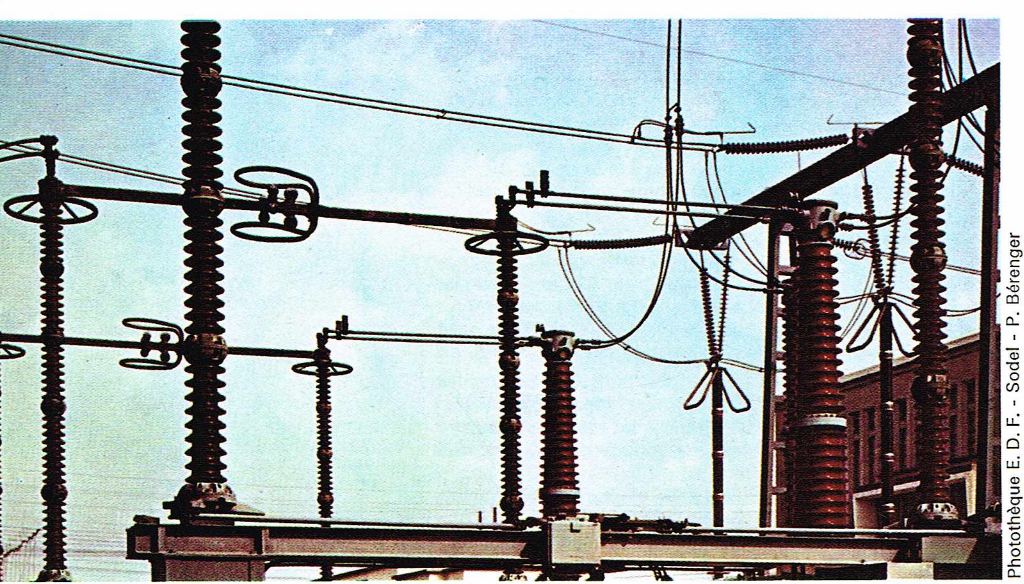


fig. 10

◀ *Figure 9 : distribution de courant continu par un réseau de 3 fils, alimenté par une source principale.*
Figure 10 : distribution de courant alternatif monophasé par un réseau à 2 ou 3 fils.



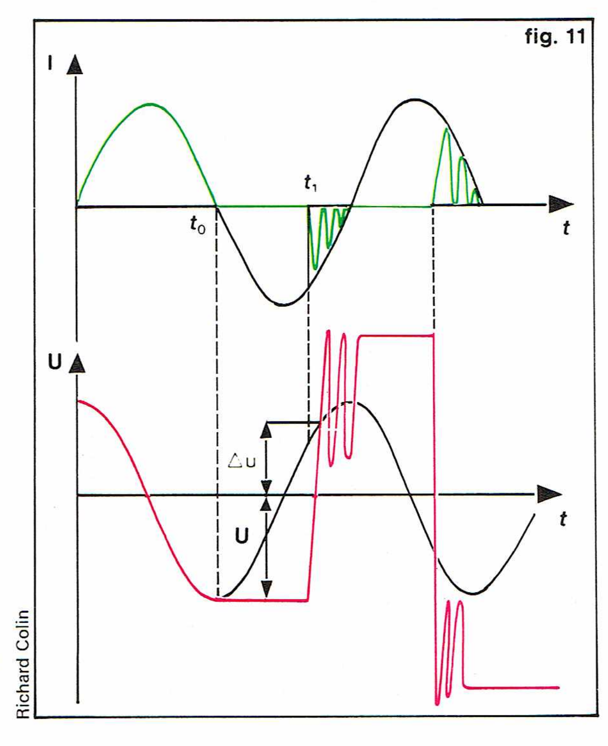
Photothèque E. D. F. - Sodel - P. Bérenger



Photothèque E. D. F. - Sodel - P. Bérenger

▲ *Les* **postes d'interconnexion** *sont les nœuds des réseaux maillés de distribution : ils sont composés des matériels nécessaires aux raccordements des lignes aériennes et souterraines : en haut, les* **jeux de barres** *(collecteurs triphasés) au poste d'interconnexion E. D. F. de Mezerolles; en bas,* **les sectionneurs de tête** *de lignes 380 kV du poste E.D.F. du Plessis-Gassot.*

Un régime transitoire peut entraîner des déclenchements en cascade à l'échelle nationale. Ceux-ci peuvent avoir pour origine des courts-circuits, des surtensions, des délestages de centrale, des mises sous tension brutales, des coups de foudre, etc. La stabilité est assurée par la qualité du matériel, par exemple la rapidité d'ouverture des disjoncteurs, les inerties des machines tournantes, la rapidité d'action des régulateurs.



▶ *Figure 11 : intensité et tension de coupure dans un circuit capacitif.*

Les postes d'interconnexion

Les postes d'interconnexion sont les nœuds des réseaux maillés. Ils sont composés des matériels nécessaires aux raccordements des lignes aériennes et souterraines. Les appareils de protection et de coupure permettent d'éliminer les portions qui présentent des défauts. Ils assurent les liaisons et la transformation de la haute tension du réseau de transport en basse tension.

L'équipement rationnel doit être caractérisé par une réalisation économique, prévue pour une longue durée d'utilisation avec la meilleure fiabilité possible, une grande sécurité, aussi bien pour le personnel que pour l'exploitation, l'entretien et les manœuvres. Toute installation est étudiée sous le triple aspect de la sécurité du personnel, du service, du matériel.

On peut distinguer les parties haute tension et basse tension. La première regroupe :

Les **jeux de barres,** qui sont des collecteurs généraux triphasés sur toute la longueur du poste. Ils peuvent être sectionnés à l'aide de « sectionneurs ». Chaque jeu est équipé d'un ensemble d'appareils de mesures qui permettent les manœuvres et les contrôles. Notons qu'on donne le nom de « jeux de barres » à tous collecteurs de circuits, quel que soit le type de conducteurs : barres, tubes, profilés, câbles... Les liaisons peuvent donc être faites par conducteurs tendus : cuivre, aluminium, aluminium-acier, etc.; par conducteurs rigides; sous enveloppe métallique.

Les **sectionneurs,** qui permettent d'interrompre ou d'établir une liaison ou de commuter sous tension des jeux de barres ou des transformateurs sur un jeu de barres. Leur mise en place résulte de l'étude des manœuvres d'entretien. Ce sont des appareils à coupure visible dont le pouvoir de coupure est limité au courant capacitif du jeu de barres, traversées, connexions, courtes longueurs de câbles... Leur distance d'ouverture est suffisante et ils peuvent être verrouillés et condamnés en position ouverte. Un circuit ouvert à l'aide de sectionneurs permet d'y effectuer des travaux sans danger. Ils peuvent être commandés mécaniquement sur place ou à distance; dans ce cas, les commandes sont électriques, hydrauliques ou pneumatiques. Un sectionneur à commande à distance doit posséder une commande manuelle de secours. Toutes les précautions sont prises pour éviter les manœuvres intempestives.

Les **transformateurs de puissance,** qui permettent l'interconnexion des réseaux ayant des tensions différentes. Ils doivent pouvoir supporter des régimes déséquilibrés et fonctionner en parallèle. Quand leur puissance est suffisante, ils sont munis de dispositifs de surveillance, de réglage et de commande. Ils sont protégés pour éviter les défaillances internes et limiter les conséquences de régimes de fonctionnement anormaux.

Les **disjoncteurs haute tension,** qui coupent les circuits en charge sous l'intensité normale au cours des manœuvres courantes ou une intensité de défaut. Les conditions à satisfaire pour couper un réseau sont succinctement les suivantes; trois cas doivent être considérés : la coupure d'un circuit purement résistant où U et I sont en phase, la coupure d'un circuit inductif, et celle d'un circuit capacitif. A l'ouverture des contacts d'un disjoncteur, un arc s'amorce entre les pôles. Il est constitué d'une colonne gazeuse incandescente qui provient de la décomposition des gaz du milieu ambiant et des gaz ionisés dus à la vaporisation du métal des contacts. L'extinction de l'arc n'a lieu qu'au passage à zéro de l'intensité qui traverse le disjoncteur. Il faut d'autre part que la tension entre les contacts ne se rétablisse pas trop rapidement dans un délai inférieur au temps de désionisation des gaz. Suivant le cas, il y a extinction ou réamorçage. Quand le circuit est purement résistif, l'extinction a généralement lieu sans difficulté. Par contre, quand le circuit est capacitif, le problème est plus complexe. C'est le cas de l'ouverture d'une ligne à vide à cause des capacités entre phases et entre phases et terre. Ici, le courant est pratiquement déphasé de $\pi/2$ en avant sur la tension, mais sa valeur, de quelques dizaines d'ampères, est faible. Au cours de la coupure, quand l'intensité passe par zéro, au temps t_0 la tension est maximale (*fig.* 11). Les contacts étant ouverts, la ligne, sous le potentiel U, est chargée et se comporte comme un condenseur. Quand la demi-alternance de la tension devient positive, la différence de potentiel entre les contacts augmente jusqu'à $U + \Delta u$

et un arc s'amorce au temps t_1. Le transfert d'énergie entre le conducteur et la source engendre un régime oscillatoire haute fréquence. Au nouveau passage à zéro de l'intensité, l'arc s'éteint mais la différence de potentiel entre les contacts a augmenté. Ce régime transitoire peut se poursuivre et atteindre des tensions dangereuses sur la ligne susceptibles d'aller jusqu'au contournement des isolateurs. Les disjoncteurs sont étudiés pour ne donner naissance qu'à des tensions relativement réduites.

Le problème est aussi complexe quand le circuit est inductif comme la coupure d'inductances ou de transformateur à vide. La coupure d'un courant de court-circuit nécessite l'ouverture d'un circuit dont l'intensité efficace peut atteindre plusieurs milliers d'ampères et le déphasage entre U et I peut être de 80° arrière. Comme dans le cas précédent, à chaque extinction de l'arc, la remontée rapide de la tension entraîne un réamorçage et un régime oscillatoire. L'extinction de l'arc est favorisée par le soufflage et le refroidissement, et elle dépend du diélectrique dans lequel se trouvent les contacts. Trois diélectriques principaux sont employés : l'air, l'huile et l'hexafluorure de soufre (SF_6). L'air est employé à forte pression : 20 à 30 bars ; sa tenue électrique, sa stabilité chimique, son pouvoir extincteur et son refroidissement de l'arc sont bons. L'huile est utilisée à faible pression, ses caractéristiques sont moyennes ou bonnes, mais elle est inflammable. L'hexafluorure est employé à faible ou à forte pression (15 bars) ; ses caractéristiques sont très bonnes, mais il se liquéfie à 40 °C à basse pression, et à 0 °C à forte pression.

Dans un disjoncteur à huile, au moment de la coupure, l'arc, qui est à environ 3 000 °C, forme une poche de gaz entre les contacts, la pression augmente, ce qui facilite l'extinction. Pour éviter l'explosion de l'appareil, on ajoute des chambres. On peut encore entourer ces chambres d'un acier revêtu d'un matériau isolant. A la formation de l'arc, la pression est très importante, mais le gaz ne peut s'échapper que lorsque le contact mobile sort de cette chambre. L'arc est alors violemment soufflé.

Il existe deux types principaux de disjoncteur à air comprimé : les appareils autopneumatiques où l'air provient d'un piston mis en mouvement en même temps que le contact mobile (leur pouvoir de coupure est limité à environ 30 MVA en MT) ; les appareils à réserve d'air comprimé dans lesquels le soufflage, très énergique, peut être obtenu longitudinalement, ou radialement, ou transversalement.

Les disjoncteurs à hexafluorure de soufre, par la grande rigidité diélectrique du SF_6, sont construits en postes blindés et occupent un volume faible qui oriente naturellement leur utilisation aux zones urbaines où les volumes sont réduits.

Dans tous ces disjoncteurs, la vitesse de séparation des contacts doit être grande et atteint quelquefois 15 m/s. L'énergie emmagasinée est libérée en un temps très court. On distingue des commandes électromécanique à ressorts bandés par moteur, électrique à solénoïde (pratiquement abandonnée), pneumatique qui meut un piston solidaire du contact mobile, oléopneumatique par de l'azote sous pression dans un accumulateur qui déplace, par un système hydraulique, un vérin lié au mécanisme.

Appareils de protection contre les surtensions. Il est indispensable de protéger les matériels contre les surtensions, quelle que soit leur origine. Contre les surtensions d'origine atmosphérique, on place des parafoudres à résistance variable ou des éclateurs montés sur les chaînes d'isolateurs. Contre les surtensions dues aux défauts d'isolement, on assure une coordination entre les tensions auxquelles doivent tenir les matériels et les résistances des prises de terre.

Les **prises de terre.** Elles ont une importance primordiale, car elles assurent, par l'intermédiaire de systèmes appropriés, la sécurité du personnel et des matériels. Toutes les masses sont reliées à la prise de terre : gaines, écrans des câbles, cuves, bâtis, cuves de transformateurs, panneaux grillagés, points communs des enroulements primaires des TP, points communs des enroulements secondaires des transformateurs de mesure, les parafoudres, les couteaux de mise à la terre, les canalisations métalliques, les charpentes métalliques, etc. Les conducteurs de terre doivent avoir une section $\geqslant$ 25 mm² et supérieure à celle du conducteur de protection de plus faible section. Son échauffement admissible est 160 °C s'il est isolé et 180 °C s'il est nu. Aucun fusible ou organe de coupure n'est intercalé dans ce conducteur. La prise elle-même est constituée par des câbles, du grillage, des plaques, etc.

Classement des ouvrages des installations de distribution

Dans les installations de distribution, les ouvrages sont classés en trois catégories suivant la valeur nominale de la tension exprimée en valeur efficace pour le courant alternatif.

Sont classés en première catégorie les ouvrages dont la tension nominale ne dépasse pas 500 V en courant alternatif ou 750 V en courant continu ; en deuxième catégorie les ouvrages dont la tension nominale est inférieure à 50 000 V ; en troisième catégorie ceux dont la tension nominale est égale ou supérieure à 50 000 V.

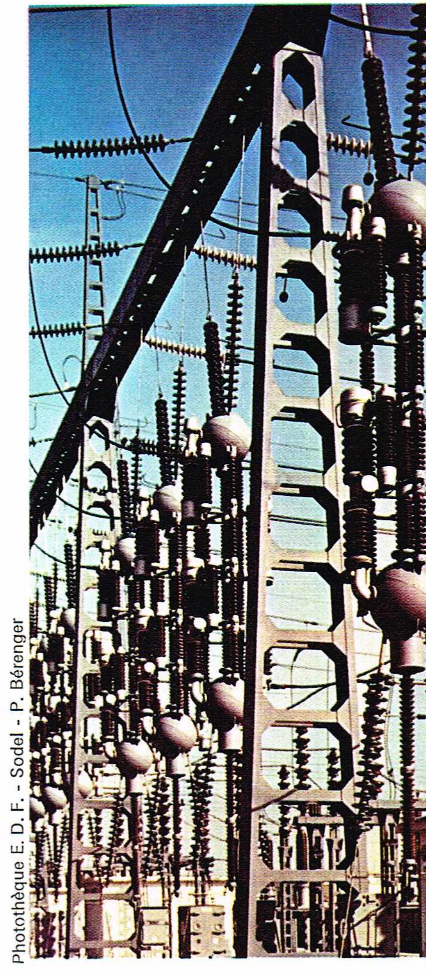
* *Ouvrages de première catégorie*

Le point le plus bas des conducteurs traversant les voies publiques est au moins à 6 mètres au-dessus du sol. Cette distance peut être réduite si les conducteurs sont isolés, ce qui est obligatoire pour les traversées d'équipements sportifs et établissements scolaires. Pour les conducteurs nus cette distance peut être ramenée à 1 m par rapport aux façades et aux toitures dont la pente est supérieure à 45°. Les conducteurs isolés ne doivent pas être situés à moins de 30 cm au-dessous des fenêtres, si aucune protection n'est prévue. Ils ne doivent pas être situés à moins de 2 m du sol, sauf s'il est prévu une protection mécanique résistant aux chocs. Il faut prévoir une gaine isolante supplémentaire aux abords de toute partie métallique extérieure aux bâtiments, sinon la distance minimale à respecter est 5 cm. Le point neutre doit être relié directement à la terre dans le cas de distributions monophasées. Il en est de même avec le triphasé où une liaison directe doit être établie entre la terre et le point neutre. Pour ces distributions triphasées, il doit y avoir au moins une mise à la terre par 1 000 m de longueur de ligne. Dans les zones où les orages sont fréquents, il y a lieu de faire une mise à la terre tous les 300 m et de placer à chaque branchement un jeu de parafoudres entre les conducteurs de phase et le fil neutre où ce dernier est mis à la terre. S'il y a voisinage avec une autre ligne de première catégorie à supports indépendants, la distance minimale entre deux conducteurs est 1 m. Quand les supports sont communs, les conducteurs appartenant à la plus basse catégorie sont placés au-dessous des autres.

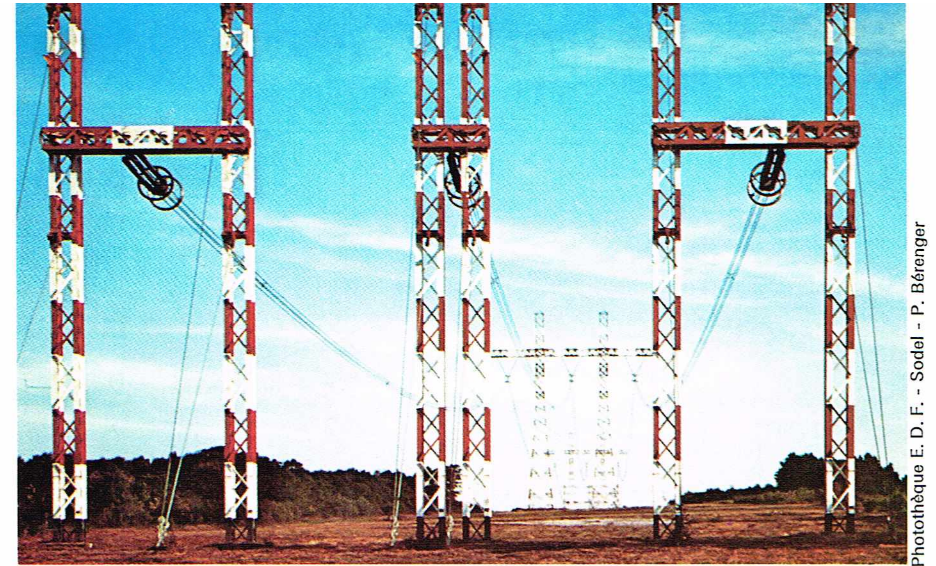
* *Ouvrages de deuxième catégorie*

Le point le plus bas des conducteurs traversant les voies publiques est au moins à 8 m au-dessus du sol pour les conducteurs nus. Cette distance est ramenée à 6 m si la ligne longe des voies publiques ou passe sous des ouvrages d'art. Pour les conducteurs nus, la distance minimale avec les habitations est 3 m. Les conducteurs isolés doivent être protégés mécaniquement s'ils sont à moins de 2,5 m au-dessus du sol et de 0,5 m en dessous. Le point neutre doit être relié à la terre, soit directement, soit par l'intermédiaire d'une faible impédance. Tous les supports doivent être munis d'un dispositif antiescalade et d'une plaque réglementaire portant l'indication « Défense absolue de toucher aux fils, même tombés à terre », suivie en gros caractères des mots « Danger de mort ». Les caractéristiques de cette plaque sont déterminées par un arrêté ministériel du 14 mai 1963. Dans la mesure du possible, il ne faut pas mettre de supports dans les établissements scolaires et les lieux sportifs, et l'on ne doit pas en mettre à moins de 10 m d'une piscine en plein air.

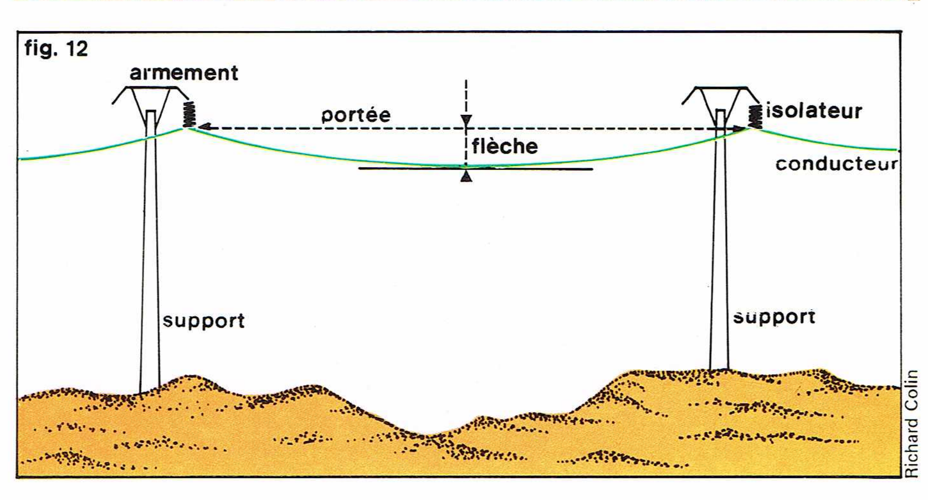
Quand deux lignes de première et deuxième catégorie ont les mêmes supports, celle de plus faible catégorie doit être au-dessous et la charge de rupture des conducteurs de la deuxième catégorie doit être supérieure à 4 800 newtons. Sur les supports aériens peuvent être placés des transformateurs, des sectionneurs et des interrupteurs. Les transformateurs doivent pouvoir être isolés du réseau de distribution par un appareil de sectionnement monté lui-même sur poteau et manœuvrable du sol. Le mécanisme doit comporter un double isolement et doit être immobilisé par cadenas en position ouverte ou fermée. La personne chargée de cette manœuvre doit monter sur une plate-forme isolée du sol. Évidemment, toutes les parties métalliques hors tension sont mises à la terre.


Photothèque E. D. F. - Sodel - P. Bérenger

▲ **Disjoncteur *à réserve d'air comprimé (à pression permanente) et à coupure multiple du poste E.D.F. du Plessis-Gassot.***



Photothèque E. D. F. - Sodel - P. Bérenger



Richard Colin

▲ *En haut, vue générale de la ligne électrique aérienne expérimentale de 1 000 000 volts installée au laboratoire E. D. F. des Renardières. En bas, figure 12 : représentation schématique d'une ligne électrique aérienne.*

* *Ouvrages de troisième catégorie*

Le point le plus bas des conducteurs traversant les voies publiques est au moins à 8 m au-dessus du sol pour les conducteurs nus. Cette distance est ramenée à 6 m pour les terrains de toute nature. Pour les conducteurs nus, la distance minimale avec les habitations est 3 m. Les conducteurs isolés doivent être protégés de la même manière que ceux de la deuxième catégorie. Il en est de même pour les supports.

Les lignes aériennes

Les lignes aériennes sont utilisées quelle que soit la catégorie des ouvrages, depuis les lignes de distribution basse tension de quelques centaines de volts aux lignes THT couramment employées de 380 000 volts, y compris la ligne expérimentale E. D. F. de 1 000 000 volts installée au laboratoire des Renardières. Ce procédé de transport est souvent plus économique que les canalisations souterraines. Une ligne se compose de supports ; la distance entre deux supports consécutifs est la portée. Entre deux supportages, un conducteur épouse la forme de la courbe représentant un cosinus hyperbolique caractérisée par une flèche, qui est la distance verticale comprise entre la droite joignant les deux supports et la tangente au conducteur parallèle à cette droite (*fig.* 12).

* *Les supports*

Ils sont de trois natures : en bois, en béton armé et métalliques. Ils doivent supporter des efforts verticaux dus aux charges, des efforts horizontaux et obliques dus aux tensions mécaniques importantes.

Les **poteaux en bois** sont peu utilisés en France, car leur résistance mécanique est relativement faible et leur durée de vie assez courte. Par contre, ils sont économiques, légers, faciles à transporter et à mettre en œuvre. D'autres pays, comme les États-Unis, les emploient couramment. L'effort transversal en sommet de poteau peut avoir n'importe quelle direction à cause de leur section circulaire, mais ne peut dépasser 3 000 newtons. Malgré les traitements chimiques (imprégnation de créosote), le bois pourrit à la limite du sol, et fréquemment les insectes le rongent. Les essences des bois les plus employés sont : le sapin, le pin, l'épicéa. Les hauteurs courantes sont de 8, 10, 12 et 15 m pour des diamètres s'échelonnant de 15 à 35 cm. Suivant les efforts nominaux, reportés à 25 cm au-dessous du sommet, on prend des poteaux simples (jusqu'à 485 décanewtons), des poteaux jumelés (jusqu'à 810 daN), des poteaux contre-fichés (jusqu'à 1 410 daN) et des poteaux haubanés (jusqu'à 4 130 daN).

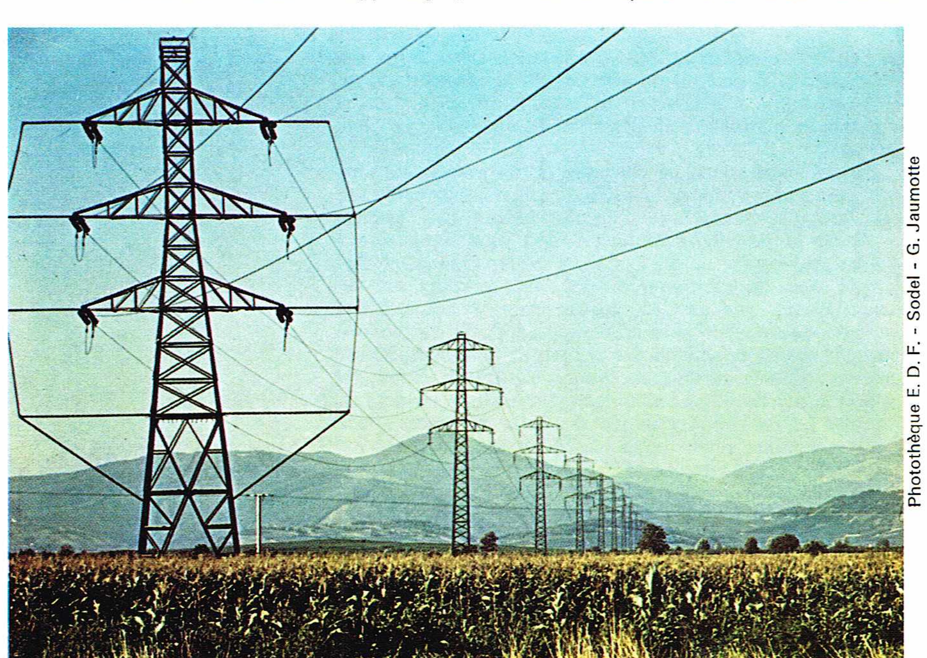
Les **poteaux en béton armé** sont assez utilisés parce qu'ils ne nécessitent que peu de frais d'entretien. Ils sont résistants et leur durée de vie est longue. En contre-partie ils sont lourds et chers. Ils sont employés pour toutes les tensions. On distingue les poteaux en béton armé ordinaire à 400 kg de ciment par m^3. Les fers à béton sont en acier de 10 à 15 mm de diamètre pour les armatures longitudinales ; les étriers ont 5 mm de diamètre. Dans les angles, les fers sont recouverts par 20 à 30 mm de béton. Ils sont généralement ajourés et leur section peut être quelconque. Leur fabrication n'apporte pas de difficulté : les hauteurs totales sont 9, 10, 11, 12, 13 et 14 m, et les efforts vont de 150 à 1 250 daN.

Les **poteaux en béton armé précontraint** sont très utilisés. Les armatures longitudinales sont en acier, dont le diamètre est de l'ordre de 5 mm, à limite d'élasticité élevée, environ 1 500 N/mm^2. Ils sont mis en tension sous un effort de 1 100 N/mm^2 au coulage du béton. Quand le poteau est sec, les vérins de mise en tension sont relâchés ; les fils d'acier exercent une précontrainte longitudinale en conservant dans chacun d'eux une contrainte voisine de 1 000 N/mm^2. Cela permet aux poteaux de supporter des efforts en tête importants : 5 000 à 10 000 N.

Les **poteaux en béton armé centrifugé** nécessitent un matériel spécial. Ils sont constitués d'une armature longitudinale prise en sandwich entre deux enroulements métalliques en spirale. L'ensemble est placé dans un moule avec du béton à 450 kg de ciment par m^3. Auparavant, les armatures métalliques ont été calées pour qu'elles ne touchent pas au coffrage. Le moulage est alors entraîné progressivement jusqu'à la vitesse de rotation de 800 tours/mn. Ce procédé élimine les poches d'air, assure une parfaite homogénéité du béton et une étroite liaison entre les fers et le béton. Les résultats obtenus sont remarquables. La durée de vie est très longue, car l'homogénéité du béton empêche toute infiltration interne jusqu'aux armatures.

Les **pylônes métalliques.** Les lignes HT et THT à grandes portées sont presque exclusivement équipées de pylônes métalliques. Ils offrent les avantages d'une grande hauteur, de supporter des efforts très importants, d'être légers, d'être facilement transportables par morceaux assemblés sur place. Par contre, s'ils ne sont pas galvanisés, leur entretien entraîne des frais élevés de peinture. On peut distinguer quatre types principaux de pylônes suivant leur emplacement et le rôle qu'on leur demande de jouer. Le premier est le *pylône d'alignement* qui ne fait que supporter les conducteurs dans les parties pratiquement droites. Le second est le *pylône de traversée ;* il est comparable au précédent, mais le coefficient de sécurité est supérieur, et il est employé pour les traversées de voies de communication. Le troisième est le *pylône d'arrêt* calculé pour résister à la rupture des conducteurs. Le quatrième est le *pylône d'ancrage ;* il est comparable au précédent, mais le coefficient de sécurité est supérieur. On l'utilise pour les grands angles et les extrémités de ligne.

▼ *Pylône métallique pour ligne à très haute tension en Alsace.*



Photothèque E. D. F. - Sodel - G. Jaumotte

Les aciers employés dans la construction sont généralement de la nuance A 33. Les dimensions des cornières pour les montants et treillis sont normalisées. L'ensemble est assemblé avec des rivets posés à chaud ou par soudure à l'arc électrique. Les poutrelles sont constituées de profils dont les dimensions minimales sont 120 mm. Les calculs sont faits en considérant les efforts suivants : effort horizontal relatif à la traction maximale des conducteurs; effort dû au vent sur les conducteurs en prenant, s'il le faut, une surface de conducteur recouvert d'un manchon de givre; effort dû au vent sur le support, l'armement et les isolateurs; effort vertical dû à la masse des conducteurs, des armements et des isolateurs.

Comme les poteaux en béton armé, les pylônes métalliques sont maintenus au sol dans des massifs en béton dont le volume et la forme dépendent de la nature du terrain. Tous les supports métalliques hors tension doivent être reliés à la terre par un fer de section minimale 50 mm², boulonné au pylône à 15 cm au-dessus du massif. Ce fer traverse le massif et est déposé en fond de fouille autour du bétonnage.

* *Les isolateurs*

Ils sont en verre ou en céramique, la porcelaine n'est pratiquement plus utilisée. Le verre présente l'avantage d'être peu coûteux, et ses défauts sont faciles à déceler par simple examen visuel, aussi bien à la fabrication qu'après mise en place. Le verre est généralement trempé. Pour ce faire, on le porte à haute température, voisine de la fusion, puis on le refroidit brusquement avec des jets d'air sur toute sa surface, ce qui a pour but d'augmenter ses caractéristiques mécaniques. Les lignes HT sont montées avec des isolateurs suspendus ou des isolateurs rigides.

Les isolateurs suspendus doivent résister à un effort de rupture électromécanique de 40 kilonewtons. Ils sont en effet soumis aux efforts décrits précédemment relatifs aux masses des conducteurs, au vent, à la traction, et ils doivent évidemment assumer leur rôle principal, qui est d'isoler la ligne de la masse. Suivant la tension, on assemble plusieurs éléments en tenant compte des surtensions d'origine atmosphérique et de manœuvre, des dépôts dus à la pollution qui court-circuiterait la chaîne et du degré de sécurité. Ces assemblages suspendus sont utilisés dans les ouvrages de deuxième et de troisième catégorie. Chaque élément se compose d'une assiette isolante sur laquelle sont scellées deux parties métalliques, l'une au-dessus, l'autre en dessous, qui, par emboîtement et goupillage, permettra l'assemblage articulé de la chaîne. Pour éviter la détérioration de la chaîne par élévation de température si un arc la contourne, on place à chacune de ses extrémités des cornes ou des raquettes qui ont pour but d'éloigner l'arc des anneaux de répartition de champ électrique.

Les isolateurs rigides sont utilisés pour les ouvrages de première et quelquefois de deuxième catégorie. Une chaîne peut comporter plusieurs éléments assemblés rigidement les uns aux autres. Comme pour les précédents, les ferrures (de diamètre 20 à 25 mm) sont scellées aux assiettes par un ciment spécial. Pour les ouvrages en ligne ou en dérivation et départ de branchement, on ne prend pas en considération la charge de rupture, car les isolateurs sont choisis en fonction du diamètre des ferrures. Par contre, pour les angles importants et les arrêts, on prend, suivant les utilisations, 700 à 1 350 daN.

* *Les conducteurs*

Les conducteurs sont en cuivre ou en aluminium. On peut en retenir cinq types principaux :

— les câbles isolés à neutre porteur sont utilisés en basse tension pour la distribution de l'énergie chez les abonnés;

— les conducteurs nus pour lignes basse tension en cuivre dont les sections normalisées sont 12,57 mm², 19,63 mm², 29,3 mm², 38,2 mm² et 48,3 mm² pour les phases, et 12,57 mm², 19,63 mm², 29,3 mm² et 38,2 mm² pour le neutre;

— les conducteurs nus pour lignes BT en aluminium dont les sections normalisées sont 22 mm², 34,4 mm², 54,6 mm² et 75,5 mm² pour les phases, et 22 mm², 34,4 mm² et 54,6 mm² pour le neutre;

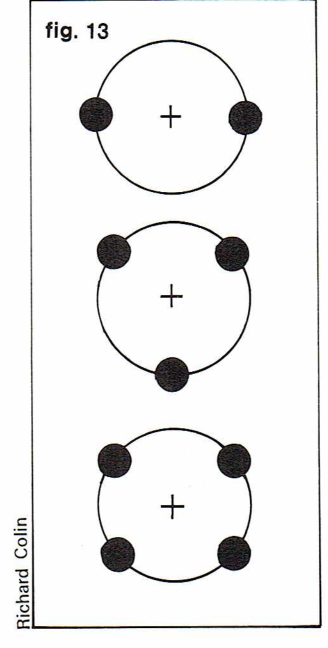
— les câbles homogènes en alliage d'aluminium (almélec);

— les câbles mixtes aluminium-acier utilisés en haute tension.


Photothèque E. D. F. - Sodel - M. Brigaud

◀ *Détail d'une* chaîne d'isolateurs *(de type suspendu) avec ses anneaux de répartition du champ électrique, appelés* anneaux de garde *(ligne expérimentale de 1 000 000 volts du laboratoire E. D. F. des Renardières).*

▼ *Figure 13 : différents types de répartition des conducteurs (2, 3 ou 4 conducteurs) de chaque phase dans les lignes à très haute tension (THT).*



Richard Colin

Le *tableau* IV donne leurs caractéristiques.

Effet couronne. Ce phénomène se produit quand la tension, entre un conducteur et le sol, augmente progressivement. A un certain seuil, une luminescence apparaît autour du conducteur ainsi qu'un bruissement très perceptible pour un observateur placé à proximité. Dans l'obscurité, il semble que le conducteur soit entouré d'une couronne lumineuse. Si la tension croît, un arc peut s'amorcer entre le conducteur et le sol. Dans les conditions normales, l'air ambiant est légèrement ionisé. Quand on soumet les ions à un champ électrique, leur mouvement s'accélère et ils acquièrent une énergie cinétique qui, grâce aux chocs supplémentaires, donne naissance à de nouveaux ions. Ce phénomène prend naissance avec un champ de 30 kV/cm environ : c'est le champ disruptif de l'air. L'air avoisinant le conducteur devient partiellement conducteur. Ce champ varie notamment suivant le rayon de courbure des surfaces sous tension. Aux très hautes tensions, on utilise l'armement des lignes en faisceau. Chaque phase est équipée de 2, 3 ou 4 conducteurs convenablement écartés les uns des autres (*fig.* 13). Cette disposition permet de réduire l'effet couronne en diminuant, à égalité de section de métal, le gradient de potentiel à leur surface.

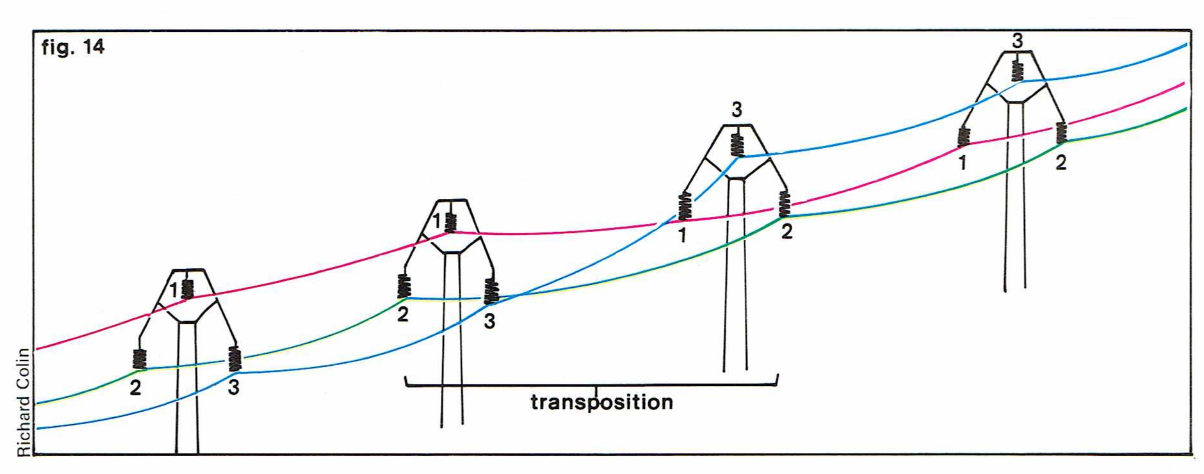
Transposition des conducteurs. Il est souhaitable qu'un circuit multifilaire soit symétrique et homogène. Dans le cas de lignes aériennes, la symétrie est irréalisable. On peut disposer les conducteurs aux sommets d'un triangle équilatéral dans le cas du triphasé, mais les conducteurs ne sont pas tous à la même distance du sol. On peut les disposer en nappe horizontale, qui assure une parfaite symétrie par rapport au sol, mais cette symétrie n'est pas réalisée entre conducteurs. On réalise artificiellement cette symétrie en transportant régulièrement les conducteurs, c'est-à-dire en leur faisant occuper successivement toutes les places possibles par permutation circulaire le long de la ligne (*fig.* 14.)

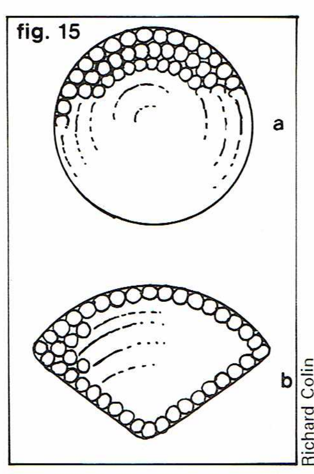
▼ *Tableau IV : caractéristiques des conducteurs des lignes électriques aériennes.*

Tableau IV
Caractéristiques des conducteurs des lignes électriques aériennes

Section (en mm²)	Nombre de fils	Diamètre de chacun de ces fils (en mm)	Résistance (en Ω/km à + 20 °C)
37,7	9 en aluminium 3 en acier	2 2	1,02
59,7	12 en aluminium 7 en acier	2 2	0,77
75,5	12 en aluminium 7 en acier	2,25 2,25	0,60
116,2	30 en aluminium 7 en acier	2 2	0,31

▶ *Figure 14 : disposition des conducteurs des lignes électriques aériennes sur les supports ; ces conducteurs occupent successivement toutes les places possibles par permutation circulaire le long de la ligne.*





▲ *Figure 15 ; les deux types de section des âmes conductrices pour le transport d'électricité par câbles isolés :*
a) *section circulaire ;*
b) *section sectorielle.*

▼ *Tableau V : caractéristiques des âmes conductrices pour le transport d'électricité par câbles isolés.*

Transport d'énergie par câbles isolés

Ce moyen est très utilisé, aussi bien en basse qu'en haute tension, et se compose, outre les conducteurs, des protections, des supports et des fixations. Les câbles peuvent être utilisés en extérieur et aériens, en extérieur et fixés à une paroi, en intérieur sous moulure, en intérieur sur chemins de câbles, en souterrain dans des caniveaux, dans des tranchées creusées dans le sol, etc. Leurs protections mécaniques dépendent des locaux dans lesquels ils sont installés ; des symboles normalisés désignent ces locaux : H0 : locaux secs, H1 : locaux temporairement humides... Y : locaux présentant des risques d'incendie, Z : locaux présentant des risques d'explosions. Leur installation doit être faite en prenant toutes les précautions ; il faut notamment éviter de mettre côte à côte des tensions très différentes, des fonctions différentes, par exemple les commandes, le contrôle, les alimentations de puissance, les télécommunications..., des câbles et des canalisations de gaz, d'eau.

* *Les conducteurs*

Les conducteurs isolés sont constitués d'âmes conductrices protégées par des isolants.

Les *âmes conductrices* sont le plus généralement en cuivre ou en aluminium qui sont des métaux présentant une bonne conductibilité de manière à produire le minimum de pertes. Elles doivent présenter une bonne résistance mécanique et suivant l'utilisation être souples pour faciliter la pose et évidemment le transport. Cette souplesse est obtenue en divisant l'âme en plusieurs conducteurs : plus leur nombre est important, plus la souplesse est grande.

Les sections des conducteurs rigides sont, en mm² : 1,5 ; 2,5 ; 4 ; 6 ; 10 ; 16 ; 25 ; 35 ; 50 ; 70 ; 95 ; 120 ; 150 ; 185 ; 240 ; 300 ; 375 ; 500 ; 630 ; 800 ; 1 000 ; celles des conducteurs souples : 0,5 ; 0,75 ; 1 ; 1,25 ; 2,5 ; 4 ; 6 ; 10 ; 16 ; 25 ; 35 ; 50 ; 70 ; 95 ; 120 ; 150 ; 185 ; 240 ; 300 ; 375 ; 500. Quand l'âme est constituée par un fil unique, elle est massive ; quand elle constituée de plusieurs conducteurs, elle est câblée. Les principales caractéristiques sont données par le *tableau* V.

Les âmes peuvent avoir une section circulaire ou sectorielle (*fig.* 15). Les premières permettent d'obtenir une répartition plus uniforme du gradient de potentiel dans le diélectrique, et on les utilise en HT de préférence aux secondes. Il existe aussi des âmes rondes rétreintes, creuses en brins circulaires, creuses en brins profilés, ovales, segmentées.

* *Les isolants*

De la constitution chimique d'un isolant dépend sa résistivité qui varie aussi, dans de larges limites, avec le champ électrique. On peut distinguer deux types principaux d'isolants : le papier imprégné, pour lequel nous ne donnerons que peu de renseignements, car il est de moins en moins utilisé, de même que le caoutchouc ; on leur préfère le polyéthylène et le polychlorure de vinyle. Le papier imprégné : des bandes sont enroulées en hélice sur l'âme, étuvées et imprégnées d'huile de vaseline. Les caoutchoucs naturel, synthétique, vulcanisé, butyle sont pratiquement abandonnés. Par contre, les caoutchoucs de silicone qui résistent bien aux températures élevées sont encore employés dans le câblage des circuits de sécurité.

Le *polyéthylène.* Cet isolant synthétique a une permittivité, une résistivité thermique et des pertes diélectriques faibles. Il est obtenu par polymérisation de l'éthylène. Le polyéthylène réticulé résiste mieux au fluage à chaud et propage difficilement la flamme. Ses propriétés mécaniques sont très bonnes. Il est employé pour toutes les tensions, BT, HT et THT jusqu'à 225 000 V .Les gradients de potentiel sont les suivants : câbles à 63 kV : 5 kV/mm, câbles à 225 kV : 9 kV/mm. Les températures sont, en fonctionnement normal : 70 °C ; et, en court-circuit : 150 °C.

Le *polychlorure de vinyle* (PVC) est obtenu par polymérisation du chlorure de vinyle et mélangé à des stabilisants et à des plastifiants. Il ne transmet pas la flamme. Par contre, les pertes diélectriques sont plus importantes que pour le polyéthylène.

* *Les gaines de protection et d'étanchéité*

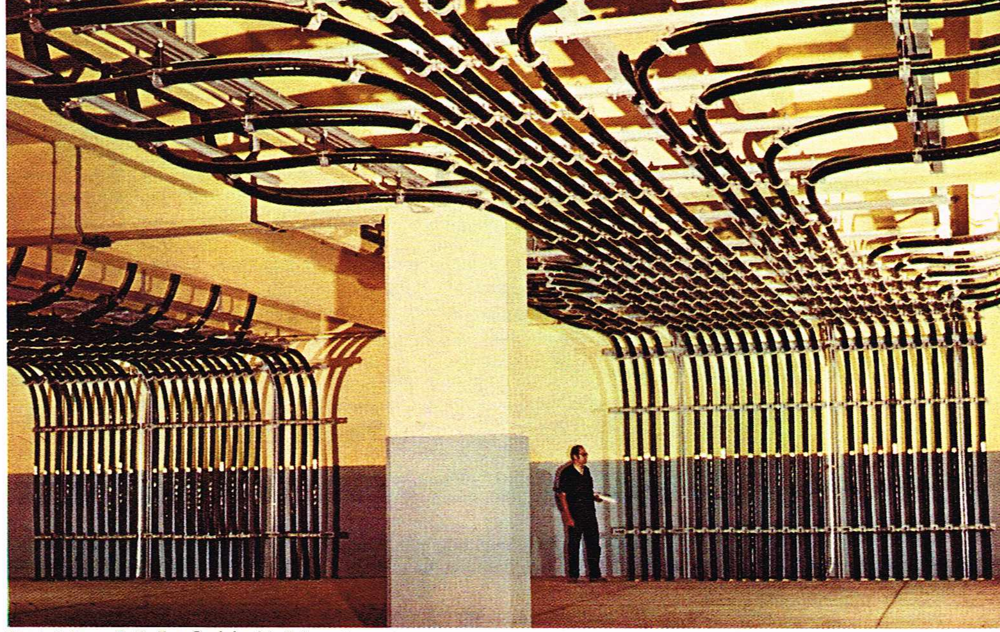
Les gaines de protection mécanique sont en feuillard d'acier ou en fil d'acier. Les gaines d'étanchéité aux agents chimiques et physiques sont en aluminium, en matériaux synthétiques ou en plomb. Le plomb, mis en place par filage, permet une étanchéité parfaite. L'aluminium supporte mieux les vibrations que le plomb, mais tous deux sont vulnérables à la corrosion électrochimique. Les gaines en polyéthylène ou PVC ont une bonne résistance mécanique, notamment au déchirement. Le polychloroprène est souple et ne transmet pas la flamme. Mélangé à du carbone, il résiste bien à la chaleur et à la lumière.

* *Les différentes sortes de câbles*

Qu'ils soient unipolaires ou multipolaires, et quelle que soit la nature des isolants, les câbles sont constitués, suivant la tension de service, des composants suivants en BT : de l'âme et d'une ou plusieurs enveloppes isolantes ; en MT et HT : de l'âme, d'enveloppes isolantes, de gaines de protection mécanique, d'une enveloppe isolante. Hormis les câbles isolés au papier imprégné, on trouve les *câbles à pression interne de gaz* dans lesquels, pour éviter les amorçages dus aux bulles de gaz dans les isolants, on soumet l'isolant à une pression suffisante telle que la tension de décharge disruptive ne soit pas atteinte. Entre 1 et 15 bars, les gradients de potentiel peuvent varier de 6 kV/mm à 19 kV/mm. Le gaz le plus couramment employé est l'azote.

Tableau V
Caractéristiques des âmes conductrices pour le transport d'électricité par câbles isolés

Métal	Masse atomique (en g)	Masse volumique (en kg/m³)	Résistivité à 20 °C (en Ω · m)	Charge de rupture (en N/m²)
Cuivre	63,57	8 890	$17{,}24 \cdot 10^{-9}$	environ $250 \cdot 10^{6}$
Aluminium	27	2 703	$2{,}8 \cdot 10^{-9}$	environ $140 \cdot 10^{6}$



Photothèque E. D. F. - Sodel - M. Brigaud

▲ Départ des « artères » de 20 kV du poste MT des Buttes-Chaumont à Paris (réseau triphasé) ; ces câbles sont constitués de l'âme conductrice, d'enveloppes isolantes, de gaines de protection mécanique et d'une dernière enveloppe isolante.

Dans les *câbles à huile fluide*, l'huile peut se dilater librement grâce à des réservoirs sous pression en liaison avec la gaine d'étanchéité. On peut réaliser ainsi des câbles unipolaires de transport d'énergie prévus pour 600 kV entre phases dans lesquels le conduit d'huile est au centre de l'âme.

On peut placer les câbles dans un tube sous pression, on obtient un câble sous tube. L'installation est complexe, car il faut absolument assurer la pression sous peine de claquage.

Les *câbles à isolement sec*. Il en existe deux types : les câbles à champ radial dans lesquels l'enveloppe isolante de chaque câble est recouverte d'un écran constitué d'un ou de plusieurs rubans de cuivre, et les câbles à champ non radial dans lesquels un écran est placé sur la ceinture isolante. Avec les premiers on peut atteindre 220 kV entre phases, avec les seconds quelques milliers de volts seulement.

Désignation des câbles. La désignation des câbles est normalisée. Pour les conducteurs des installations intérieures, on trouve une lettre (U) qui indique que le conducteur est normalisé, suivie d'un chiffre qui est la tension nominale de fonctionnement en volts. On trouve ensuite des lettres qui indiquent les natures des enveloppes isolantes en allant de l'âme vers l'extérieur.

Repérage des conducteurs BT. Ce repérage fait l'objet de la norme NF C 15-100 qui résulte « des études entreprises par les organismes de normalisation de pays du Marché commun (CENELCOM) ». Le conducteur de protection a la double coloration vert-jaune ou vert-noir. Le conducteur neutre a la couleur bleu clair. La norme UTE 15-123 indique clairement que, « des erreurs étant toujours possibles, il est toujours nécessaire de vérifier la polarité des conducteurs avant toute intervention ». Les couleurs normalisées des conducteurs de phases sont le *noir*, le *brun* et le *bleu clair* (*tableau* VI).

Protections électriques des matériels

Ces protections ont pour rôle de déceler puis de signaler et/ou mettre hors circuit un élément de réseau lorsqu'un défaut d'isolement ou un court-circuit s'y produit. Il faut non seulement limiter les dégâts matériels, mais assurer la production d'énergie en maintenant le fonctionnement général du réseau ou de la centrale et quelquefois sa stabilité. Le cerveau de ces protections est constitué par les relais qui sont de petits équipages mobiles électromagnétiques ou entièrement statiques sensibles à la tension ou au courant du réseau à surveiller. Ces organes à courants faibles ne sont jamais montés directement sur les réseaux (sauf en BT), mais par l'intermédiaire de transformateurs de potentiel ou d'intensité. Ces systèmes doivent être sûrs, sélectifs, sensibles et rapides. Ils doivent agir en cas de court-circuit, surtension, surcharge et déséquilibre. Il existe des défauts permanents et des défauts fugitifs, les premiers correspondent généralement à des avaries de matériels. Les relais sont sensibles à l'une des caractéristiques suivantes : tension, intensité, fréquence, vitesse, puissances, température, composantes inverses et homopolaires, différence de phase ou d'amplitude entre courant d'entrée et courant de sortie d'un élément de réseau, pression, niveau... Pour assurer ces fonctions, on distingue les relais « tout ou rien », les relais à « maximum » et à « minimum », les relais instantanés, les relais temporisés à temporisation indépendante, dépendante ou inverse, les relais d'ouverture ou de fermeture, les relais

▼ Tableau VI : affectation des conducteurs suivant la constitution des circuits (tableau 51 GD, de la publication NF C 15-100 de juin 1976, de l'Union Technique de l'Électricité).

Tableau VI - Affectation des conducteurs suivant la constitution des circuits (tableau 51 GD / publication NF C15-100 de juin 1976 - Union Technique de l'Electricité)

(1) NOMBRE DE CONDUCTEURS DU CIRCUIT	(2) CIRCUITS	(3) Conducteurs isolés					(4) CANALISATIONS FIXES – Câbles rigides $S \leqslant 25$ mm² et souples (toutes sections)					(5) Câbles rigides $S > 25$ mm²					(6) CANALISATIONS MOBILES – Câbles souples				
		Ph	Ph	Ph	N	T	Ph	Ph	Ph	N	T	Ph	Ph	Ph	N	T	Ph	Ph	Ph	N	T
1	De protection ou de terre					VJ															
2	Monophasés entre phases	X	X				Noir (4)	Bleu clair	(B)			Noir	Bleu clair	(B)			Noir	Bleu clair	(B)		
	Monophasés entre phase et neutre	X			Bleu clair		Noir			Bleu clair		Noir			Bleu clair		Noir			Bleu (3) clair	
3	Triphasés sans neutre	X	X	X			Noir	Brun	(B) Bleu clair			Noir	Brun	(B) Bleu clair			Noir	Brun	Bleu clair		(B) (2)
	A 2 phases et neutre	X	X		Bleu clair		Noir	Brun		Bleu clair		Noir	Brun		Bleu clair		Noir	Brun		Bleu clair	(B) (2)
	A 2 phases et conducteur de protection	X	X			VJ	Noir (4)	Bleu clair	(A)		VJ	Noir	Bleu clair			VJ (1)	Brun	Bleu clair			VJ (A)
	Monophasés phase-neutre avec conducteur de protection	X			Bleu clair	VJ	Noir (4)			Bleu clair	VJ	Noir			Bleu clair	VJ	Brun			Bleu clair	VJ (A)
4	Triphasés avec neutre	X	X	X	Bleu clair		Noir	Brun	(B) Noir	Bleu clair		Noir	Brun	(B) Noir	Bleu clair		Noir	Brun	Noir	Bleu clair	(B) (2)
	Triphasés sans neutre avec conducteur de protection	X	X	X		VJ	Noir	Brun	(A) Bleu clair		VJ	Noir	Brun	Bleu clair		VJ (1)	Noir	Brun	Bleu clair		VJ (A)
	A 2 phases et neutre avec conducteur de protection	X	X		Bleu clair	VJ	Noir	Brun		Bleu clair	VJ	Noir	Brun		Bleu clair	VJ (1)	Noir	Brun		Bleu clair	VJ (A)
5	Triphasés avec neutre et avec conducteur de protection	X	X	X	Bleu clair	VJ	Noir	Brun	(A) Noir	Bleu clair	VJ	Noir	Brun	(B) Noir	Bleu clair	VJ (1)	Noir	Brun	(A) Noir	Bleu clair	VJ

X Couleurs quelconques sauf blanc (gris), vert, jaune ou bleu clair
(A) Exécutions avec conducteur vert-jaune
(B) Exécutions sans conducteur vert-jaune
Ph Phase N Neutre T Conducteur de protection
VJ Vert-jaune

(1) Le conducteur de protection est réalisé par un conducteur vert-jaune séparé : par exemple, dans le cas de circuits à 4 conducteurs, il est fait usage de câbles à 3 conducteurs plus un conducteur séparé pour le conducteur de protection.
(2) Ces exécutions n'existent que pour les câbles à 3 et 4 conducteurs de la série U-500 SC1C de 2,5 et 4 mm² de section et de la série U-1000 SC12N de 1,5 mm² de section.
(3) Si le mode de connexion permet de déterminer la position du conducteur neutre.
(4) Brun pour les câbles souples.

Tableau VII Classification des installations électriques suivant les tensions				
Courant	Classe TBT	Classe BT	Classe MT	Classe HT
Alternatif	$U_{eff} < 50$ V	50 V $\leqslant U_{eff} \leqslant$ 430 V	430 V $< U_{eff} <$ 1 100 V	1 100 V $< U_{eff} <$ sans limitation
Continu	$U \leqslant 50$ V	50 V $< U <$ 600 V	600 V $< U <$ 1 600 V	1 600 V $< U <$ sans limitation

▲ ***Tableau VII : classification des installations électriques suivant les tensions.***

intermédiaires... Les appareils à protéger sont les conducteurs des réseaux, les transformateurs, les alternateurs, les auxiliaires et tous les appareils d'utilisation des abonnés. Les relais donnent des ordres aux appareils de coupure comme les disjoncteurs que nous avons vus précédemment au cours du présent paragraphe.

Protections des personnes

La protection contre les courants électriques dans les installations industrielles est réglementée par le décret du 14 novembre 1962, et la protection du personnel d'intervention fait l'objet de la publication UTE 513. Il est difficile de préciser les seuils dangereux pour les tensions, car ils dépendent de la durée du contact, du type de courant et de l'intensité qui traverse le corps humain. Le courant continu est généralement plus dangereux que le courant alternatif, car il électrolyse les tissus alors que le courant alternatif n'agit que sur les muscles et le système nerveux. L'impédance qu'offre le corps humain au passage du courant dépend des individus ; elle est la somme de l'impédance de la peau et de l'impédance interne du corps traversé par le courant. La première dépend de la pression de contact, de l'humidité du contact, de la qualité de la peau... On admet qu'un courant alternatif à 50 Hz est dangereux quand $I > 0{,}025$ A et $U > 25$ volts ; en courant continu, I doit être inférieur à 0,050 A et U inférieur à 50 volts.

Le décret du 14 novembre 1962 classe les installations électriques suivant les tensions données par le *tableau* VII.

En électropathologie, on définit l'électrisation comme un accident sans suite mortelle et l'électrocution comme un accident mortel. En dessous de 3 mA, l'intensité n'est pas dangereuse. Vers 8 mA, les muscles se contractent, à 15 mA, la main ne lâche plus les objets saisis ; en revanche, le phénomène inverse peut se produire, la main s'ouvre et l'individu chute. Ce courant peut entraîner une contraction des muscles respiratoires et asphyxie. A 25 mA, on peut avoir blocage du cœur. La respiration artificielle doit très rapidement être pratiquée. Il peut aussi y avoir fibrillation du cœur. Quand la coupure du courant intervient avant d'atteindre 30 mA, l'électrocution n'a généralement pas lieu, c'est pourquoi la législation a fixé ce seuil.

Pour prévenir ces accidents, on rend les organes sous tension inaccessibles, on isole ces organes, on isole par rapport à la terre les personnes qui travaillent, on relie à la terre les masses métalliques, on utilise les très basses tensions et on met en place des organes de coupure comme les disjoncteurs différentiels d'abonnés qui s'ouvrent quand Δi atteint 30 mA.

On peut très bien travailler sous tension quand toutes ces précautions sont prises. Les agents spécialisés de la Section d'études, de réalisation et d'expérimentation du Comité des travaux sous tension de l'E. D. F. travaillent couramment sur les lignes aériennes sous des tensions de 380 kV pour remplacer des chaînes d'isolateurs de pylône.

En cas de court-circuit, mauvais contacts ou surcharge, il y a danger d'incendie par augmentation de l'intensité, il faut donc protéger les installations par des détecteurs de surintensité : coupe-circuit ou bilames agissant sur un disjoncteur, ou relais agissant sur un disjoncteur.

Il faut toujours éliminer les différences de potentiel qui pourraient naître entre les masses métalliques et la terre. Pour ce faire, il est nécessaire de mettre en place une protection comportant un dispositif qui provoque une coupure automatique et une liaison électrique qui relie toutes les masses à la terre.

STOCKAGE D'ÉNERGIE

La consommation d'énergie, quelle que soit la forme de cette dernière : chimique, électrique, mécanique ou thermique, n'est jamais régulière dans le temps. Suivant le type d'activité qui est à l'origine de la dépense énergétique : industrie, usages domestiques, chauffage par exemple, les cycles de consommation ont une fréquence quotidienne, hebdomadaire ou saisonnière. Les maximums de la demande sont appelés les « pointes » de la consommation dont on sait qu'elles sont un souci permanent pour les producteurs et distributeurs d'énergie.

En regard d'une consommation de nature essentiellement variable, la production d'énergie n'a généralement pas la souplesse suffisante pour suivre les fluctuations de cette consommation. Il apparaît donc nécessaire de garder temporairement pour un usage ultérieur l'énergie excédentaire lorsque la production dépasse la demande.

Le stockage sera d'autant moins impérieux que l'on aura recherché au préalable l'équilibre de la production et de la consommation. Pour cette raison, les producteurs essaient d'influencer les consommateurs en leur offrant par exemple des tarifs préférentiels : tarif de nuit pour l'électricité, prix d'été pour les combustibles destinés au chauffage, etc. L'interconnexion des réseaux qui permet de niveler les écarts de la demande a également des résultats très positifs. Le câble de transfert d'énergie électrique entre la France et la Grande-Bretagne permet, du fait du décalage horaire entre les deux pays, une aide mutuelle pour la fourniture de l'énergie de pointe. On notera au passage que le fonctionnement d'une maison individuelle alimentée par des capteurs solaires et une éolienne pose, si l'on recherche l'autarcie énergétique, de difficiles problèmes de stockage d'énergie qui sont encore mal résolus dans l'état actuel de la technologie.

On verra au cours de ce chapitre qu'il y a d'autres raisons que la seule adaptation de l'offre et de la demande pour stocker de l'énergie. Un réseau de transport discontinu de produits énergétiques : charbon ou pétrole par exemple, ne peut fonctionner que s'il existe, tout au long des lignes de déplacement des produits, des moyens de stockage. Il existe aussi des stockages prévisionnels destinés à pallier une interruption de l'approvisionnement. On peut ranger dans cette dernière catégorie les réserves dites « stratégiques » prévues par les États en prévision d'un conflit. Les raisons ne manquent donc pas pour stocker les produits énergétiques ou l'énergie elle-même sous ses formes traditionnelles.

Comme il existe diverses formes d'énergie auxquelles sont associés des produits énergétiques différents, il va donc y avoir autant de dispositifs de stockage. L'énergie chimique des combustibles constituera par exemple une première famille et, dans cette famille, il faudra se préoccuper des différents produits couramment transportés et distribués : combustibles solides, liquides ou gazeux. Le stockage de ces différents produits donnera naissance à des types de stockage les plus divers. Ces solutions seront présentées dans ce chapitre, rangées par type d'énergie.

Chacune des formes de l'énergie a ses caractéristiques propres, comme on l'a déjà vu en matière de conversion ou de transformation. Il en va de même pour le stockage qui est plus ou moins facile suivant la forme de l'énergie considérée. Un combustible avec son énergie chimique contenue se stocke sans difficulté, l'électricité en revanche se stocke très difficilement, il faudra donc recourir, si le stockage d'une forme d'énergie est à la fois nécessaire et malaisé, à une conversion vers une forme d'énergie plus facile à stocker. Pour reprendre l'exemple de l'électricité, on peut la stocker en la convertissant en : — énergie chimique, dans des piles ou des accumulateurs ; — énergie thermique, dans des ballons d'eau chaude ; — énergie mécanique, en augmentant l'énergie potentielle d'un liquide ou l'énergie élastique d'un gaz.

Seul ce dernier type de conversion permet le stockage de grandes quantités d'électricité : l'application la plus répandue est la station de pompage. Si l'on désire après stockage retrouver l'énergie sous sa forme initiale, il faudra pratiquer la conversion inverse au moment de la restitution. Compte tenu du rendement de chaque opération, la double conversion peut pénaliser, si les rendements sont médiocres, cette façon de stocker l'énergie.

Les problèmes du stockage ne sont pas nouveaux : ils se posent depuis que l'homme manipule des produits énergétiques mais ils ne sont pas résolus pour autant. On pourrait même dire qu'ils n'ont jamais autant suscité de recherches qu'aujourd'hui. En particulier, depuis l'augmentation brutale du prix du pétrole de 1974 qui a entraîné dans son sillage les prix des autres produits énergétiques, les économies d'énergie sont venues au centre des préoccupations des responsables de tous les pays. On cherche donc à utiliser de mieux en mieux l'énergie, à éviter son gaspillage, et les techniques de conservation rejoignent bien souvent celles du stockage. Par ailleurs, on s'est résolument orienté dans de nombreux pays vers l'exploitation des ressources énergétiques renouvelables comme l'énergie solaire et l'énergie éolienne. On sait que ces énergies dites « nouvelles » sont capricieuses : le Soleil ne brille qu'une partie du jour et la captation de son rayonnement est très dépendante des conditions météorologiques ; le vent aussi est variable, en force et en direction, et ses sautes d'humeur ne sont guère prévisibles. Sans des possibilités de stockage pratiques et bon marché, ces énergies nouvelles ne connaîtront pas de développement notable.

De nombreuses recherches portent, on s'en doute, sur le stockage de l'électricité. Malgré tous les efforts entrepris jusqu'à ce jour, il n'existe pas de moyens permettant de stocker de petites quantités d'électricité. De nouveaux types de batteries ont été imaginés mais les modèles existants ont des performances insuffisantes comparées à leur poids, à leur volume et à leur prix pour donner une chance sérieuse au développement de la voiture électrique. La batterie « miracle » reste à inventer. Le stockage de grandes quantités d'électricité est possible, grâce aux stations de pompage. De nombreux projets ont déjà été réalisés ou sont en cours de réalisation. En France, on peut citer l'usine de Revin dans les Ardennes, d'une puissance de 600 MW, mise en service en 1976. Ce type d'usine est appelé à se généraliser pour autant que l'on trouve des sites convenables. Un autre procédé actuellement à l'étude qui permettrait de pallier l'absence de sites pour établir des stations de pompage est la production d'air comprimé à partir de motocompresseurs électriques. Cet air comprimé serait stocké dans des cavernes souterraines, naturelles ou artificielles, d'où il serait extrait au moment des pointes de consommation pour fabriquer de l'électricité à partir de motogénérateurs fonctionnant à l'air comprimé. Ce type d'installation pourrait peut-être faire l'objet d'une réalisation en France, d'ici à quelques années.

Parmi les autres possibilités examinées, il faut citer le stockage d'énergie dans des champs magnétiques utilisant des électro-aimants supraconducteurs. Le stockage d'énergie mécanique dans des volants tournant à grande vitesse paraît aussi prometteur. Ce dernier type de stockage pourrait être mis en œuvre sur des véhicules terrestres.

Un autre dispositif qui tarde à devenir compétitif en dépit d'études très poussées dans de nombreux pays est la pile à combustible. Cet appareil convertit directement et de façon continue l'énergie chimique en électricité. Le rendement de cette conversion peut être nettement plus élevé que celui de la conversion traditionnelle qui va de l'énergie chimique du combustible à l'électricité en passant par l'énergie thermique et l'énergie mécanique. Ces piles à combustible sont malheureusement encore trop chères pour faire une percée commerciale.

L'exploitation de l'énergie solaire pour l'alimentation énergétique de maisons individuelles pose, comme nous l'avons déjà noté, de difficiles problèmes de stockage. Recueilli à plus grande échelle, le rayonnement solaire pourrait être emmagasiné dans des stockages naturels, sous la forme d'énergie thermique. L'application la plus prometteuse, présentée dans le chapitre concernant les ressources énergétiques, est celle désignée sous le vocable « énergie thermique des océans ». Les vastes étendues d'eau qui recouvrent notre globe sont en effet des capteurs et un moyen naturel de stockage de l'énergie solaire. Malheureusement, la taille des océans est beaucoup trop grande et l'énergie recueillie est encore plus diluée après captation, ce qui rend son extraction particulièrement difficile, sauf en quelques points privilégiés où des écarts notables de température ont été constatés entre les couches d'eau superficielles et les couches profondes. Des chercheurs ont donc eu l'idée de remédier aux insuffisances du stockage naturel de la chaleur solaire en imaginant un stockage artificiel dans des lacs qui permettraient par exemple de restituer en hiver l'énergie recueillie et stockée pendant l'été. Ces lacs « solaires » différeraient des lacs ordinaires par un dosage en sels important des eaux profondes. La différence de densité obtenue bloquerait les courants de convection et permettrait de stocker de l'eau très chaude en profondeur à une température voisine du point d'ébullition.

Pour en finir avec les stockages de l'avenir, il faut à nouveau parler de l'hydrogène. On parle beaucoup pour un futur qui n'est peut-être pas aussi lointain qu'on l'imagine d'un système énergétique basé sur l'hydrogène. Celui-ci, en effet, offre du point de vue stockage les mêmes possibilités que le gaz naturel dont il pourrait utiliser les réservoirs et le réseau de distribution. Il serait donc à même de remplacer progressivement ce dernier dans tous ses usages traditionnels. Liquéfié, l'hydrogène pourrait être stocké dans les réservoirs des automobiles pour remplacer l'essence. Il pourrait également, et toujours sans aucune pollution, être transformé en électricité au moyen de piles à combustible ou de petites centrales thermiques. Cette conversion se ferait localement près des points de consommation, évitant ainsi le transport de l'électricité beaucoup plus dispendieux que celui d'un gaz. L'hydrogène pourrait être produit à partir de l'eau par électrolyse ou décomposition thermique dans des installations de production fonctionnant à l'énergie nucléaire d'abord et aux énergies nouvelles ensuite.

En conclusion, si notre avenir énergétique est lié aux réserves des ressources d'énergie que nous utilisons aujourd'hui, il est et sera de plus en plus dépendant des possibilités de stockage de ces ressources. La recherche dans le domaine du stockage de l'énergie est donc essentielle, aussi bien dans les domaines de l'extraction et de la distribution que dans ceux de la consommation.

Stockage d'énergie chimique

Les fonctions du stockage

Pour assurer la marche régulière d'une économie industrielle moderne, le maintien de stocks importants de matières premières, de combustibles et de produits manufacturés est nécessaire. Qu'ils soient financés par les producteurs, les commerçants ou les consommateurs, leur rôle est indispensable : ils sont un des rouages du mécanisme compliqué par lequel offre et demande sont tenues continuellement en équilibre. Dans l'industrie du pétrole, comme ailleurs, ils amortissent le choc des fluctuations, journalières ou saisonnières, et constituent une assurance contre les crises possibles.

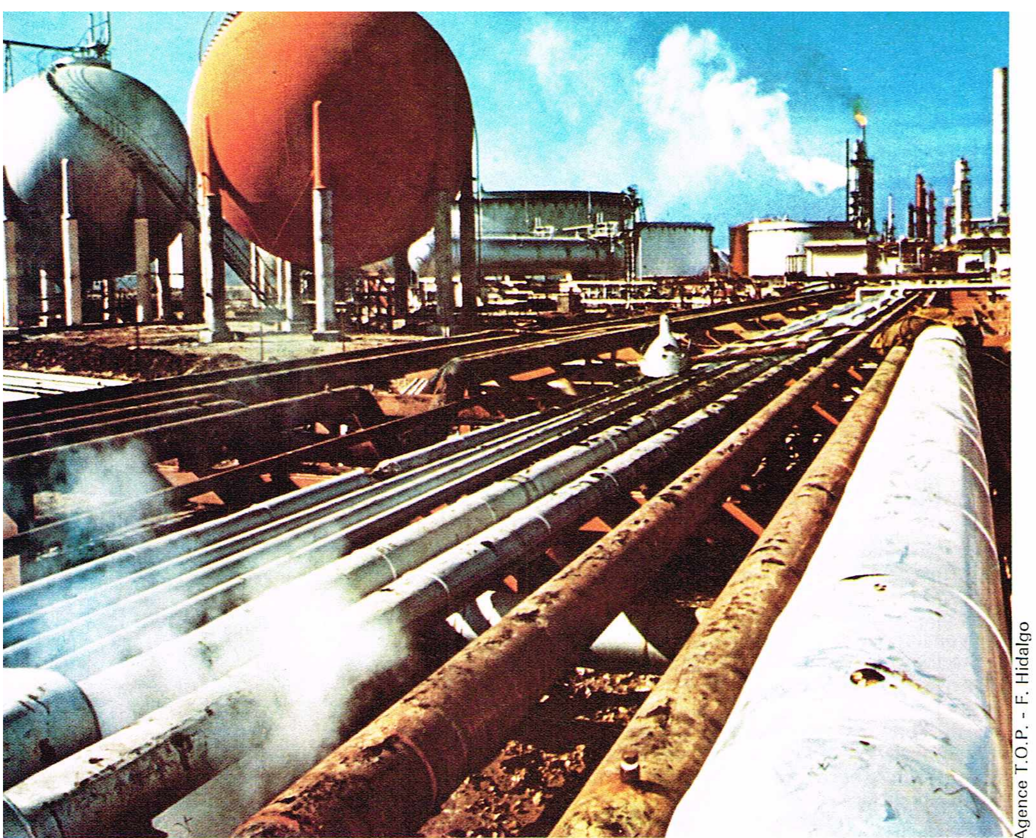
On peut distinguer quatre types de stockages : le stockage opératoire, le stockage de modulation, le stockage de distribution et le stockage de réserve et de sécurité d'approvisionnement.

Même s'il n'y avait pas de fluctuations saisonnières dans la demande, ni de précautions à prendre en vue de crises possibles, des stocks importants de pétrole seraient nécessaires pour remédier aux diverses solutions de continuité dans l'approvisionnement. Si le pétrole s'écoule sans arrêt dans les pipe-lines principaux, le chargement des tankers est toujours discontinu et il faut donc avoir des stocks aux terminaux. Les moyens de stockage doivent être, au moins, suffisants pour emmagasiner le pétrole qui atteint le terminal entre deux chargements de tankers ; il faut en outre se prémunir en cas d'interruption dans le chargement des navires par mauvais temps ou pour d'autres causes.

L'escalade dans le tonnage des tankers au cours des dernières années a entraîné l'existence de parcs de stockage de plus en plus importants dans les ports de départ et d'arrivée, puisque les tankers doivent fonctionner avec le minimum de temps morts.

Les stockages terminaux sont également nécessaires pour alimenter en brut les raffineries souvent situées dans l'arrière-pays près des centres de consommation. Dans le même ordre d'idée, il faut maintenir des stocks aux raffineries parce que ces usines marchent de façon continue alors que l'arrivée de la matière première est irrégulière.

En France, les raffineries sont tenues, par le décret du 10 mars 1958 dans le cadre de la loi du 30 mars 1923, de constituer et de maintenir un stock de chacun des pro-



Agence T.O.P. - F. Hidalgo

▲ ***Réservoirs de stockage de la raffinerie de Frontignan (France).***

duits directeurs égal au quart des quantités commercialisées au cours des douze mois précédents, à l'exclusion des produits obtenus à partir d'hydrocarbures provenant de gisements métropolitains. Une partie de ces stocks peut être constituée par le brut en place dans les raffineries avant traitement.

On trouve donc dans les raffineries trois types de stocks :

Les **stocks de brut** servent surtout pour assurer la liaison entre les livraisons de tankers et les opérations de raffinage ; ces dernières ne peuvent être étroitement tributaires des arrivages des navires-citernes et, réciproquement, ceux-ci ne doivent pas être immobilisés trop longtemps dans les ports pétroliers faute de possibilités immédiates de déchargement de leurs cargaisons. En France, ces stocks représentent environ le tiers du stock en raffinerie de tous les produits.

Les **stocks de produits intermédiaires et de produits pour mélange** sont nécessaires à la bonne marche de la raffinerie. En France, ils représentent environ 22 % du stock en raffinerie de tous les produits.

Les **stocks de produits finis,** malgré la souplesse de marche des raffineries, sont indispensables pour amortir les fluctuations saisonnières de la plupart des produits.

Les stocks de produits finis dans les dépôts de distribution assurent la liaison entre les expéditions massives à partir des raffineries et les livraisons aux utilisateurs. Les consommateurs importants sont cependant ravitaillés directement au départ des raffineries. Ces stocks contribuent en outre à l'écrêtement des pointes saisonnières.

Les stocks chez les utilisateurs ont pour objet de mettre ceux-ci à l'abri d'à-coups dans les transports et de les faire bénéficier des meilleures conditions de distribution grâce à des livraisons par gros tonnages. Selon le volume de la consommation, celles-ci s'échelonnent depuis le jeu de jerricans ou de fûts jusqu'à des réservoirs de dimensions comparables à ceux des dépôts de distribution.

Comme nous l'avons dit, la fonction la plus commune des stocks en général est sans doute de pallier les effets des fluctuations saisonnières, qu'il s'agisse de l'offre ou de la demande. Les fluctuations du côté de l'offre sont négligeables. Elles se produisent surtout du côté de la demande.

La composition des stocks de produits suivant les saisons est liée à l'amplitude des oscillations de la demande et au degré de souplesse du raffinage, ces facteurs pouvant varier considérablement d'un pays à un autre. Ainsi, l'élément saisonnier dans les stocks est beaucoup plus grand pour les huiles de chauffage que pour l'essence. Un facteur supplémentaire joue, en ce sens que les raffineries s'efforcent de porter au maximum pendant l'été la production d'essence, mais mettent moins d'enthousiasme à la réduire pendant l'hiver parce que l'essence est le produit le plus cher. Il en résulte que les stocks d'essence tendent constamment à dépasser le niveau élevé qui suffirait pour répondre aux fluctuations saisonnières de la demande. Inutile de dire que la constitution de stocks d'huile de chauffage en été et d'essence en hiver coûterait considérablement moins cher si les réservoirs étaient facilement interchangeables.

Depuis que la consommation pétrolière des pays européens s'est développée et surtout à partir du moment où les unités motorisées et aériennes sont devenues prépondérantes dans l'armée, le problème de la *sécurité d'approvisionnement* a été posé par les autorités civiles et militaires.

On peut distinguer trois « niveaux » de stocks :

— Les stocks visant à éviter qu'un pays qui reçoit de l'étranger la quasi-totalité d'une matière première indispensable à son économie ne soit étroitement tributaire de ses fournisseurs sur le plan purement commercial.

— Les stocks visant à assurer la sécurité dans des éventualités de diverses natures (guerres, troubles intérieurs, boycottages politiques, etc.) survenant chez les pays extra-européens fournisseurs de pétrole et se traduisant par une interruption subite des expéditions.

— Les stocks visant à assurer la sécurité dans l'hypothèse d'un conflit généralisé qui se traduirait alors par un arrêt total des arrivages extérieurs, avec des difficultés éventuelles de transport intérieur du fait d'actes de guerre sur le territoire métropolitain.

Il faut remarquer que le volume de pétrole requis pour pallier les oscillations journalières est souvent sous-estimé. Aux États-Unis, les deux tiers des stocks normaux de brut sont constitués par du brut dans les pipe-lines, en transit par tankers, dans les wagons, etc., et par les stocks « outils » nécessaires aux raffineries et ailleurs. Ces stocks de base, et il en va de même pour tous les pays pétroliers, ne sont pas disponibles pour la distribution puisqu'ils sont essentiels pour assurer le fonctionnement régulier du système.

Principaux stockages

Réservoirs « atmosphériques »

Ce sont des réservoirs verticaux cylindriques. Il en existe plusieurs variétés : à toit fixe, à toit flottant et à toit ouvert.

Il est certain qu'une augmentation de la taille d'un réservoir entraîne une diminution du coût de stockage ; en effet, on quadruple le volume de produit stocké en doublant la surface d'acier utilisé.

Actuellement, l'économie réalisée par mètre cube stocké disparaît au-delà d'une certaine capacité. Il faut attendre que de nouveaux matériaux, tels que certains aciers spéciaux, le titane ou les plastiques renforcés, soient produits à des prix moins élevés. Cependant, leurs propriétés de résistance et de faible poids devraient leur permettre de grandes performances dans ce domaine.

On compte actuellement plusieurs réservoirs métalliques géants dont la capacité est comprise entre 100 000 m^3 et 150 000 m^3 et quelques-uns dont la capacité dépasse 150 000 m^3, l'on parle même de réservoirs de 200 000 m^3.

* *Les réservoirs flottants sans fond*

Certaines des difficultés rencontrées pour trouver des emplacements de stockage de pétrole peuvent être évitées par la méthode dite « Swedish Seatank » utilisable partout où de l'eau propre existe. Contrairement aux réservoirs de stockage sur terre, les réservoirs flottants ne nécessitent pas de fondations onéreuses, sont mobiles et, d'après leurs promoteurs, leur construction coûte moins cher. En effet, les tôles utilisées sont beaucoup plus minces que celles nécessaires aux installations à terre. Certains de ces réservoirs sont même construits en polyester renforcé par des fibres de verre. Des réservoirs construits en Angleterre atteignent 80 000 m^3 et servent surtout au stockage du pétrole brut.

* *Les réservoirs sous pression*

Les réservoirs métalliques de stockage sous pression sont d'une capacité unitaire plus limitée malgré les progrès accomplis dans la métallurgie, la chaudronnerie et la soudure. On ne peut donc accroître la capacité des parcs de stockage qu'en multipliant le nombre de réservoirs.

Le stockage des hydrocarbures gazeux se présente sous deux formes :

— Les batteries de gazomètres humides à basse pression. Cette solution classique est démodée pour de nombreuses raisons : montage délicat, entretien coûteux, investissement important, capacité relativement faible, encombrement important, aspect inesthétique...

— Les batteries de gazomètres secs à volume constant et haute pression. La réalisation de stations gazométriques à haute et moyenne pression se justifie pour le stockage du gaz naturel à proximité des centres de consommation. Les réservoirs sont cylindriques ou sphériques, en acier conçu pour une pression de 4 à 20 hpz. Chaque élément a normalement un volume de 100 à 2 500 m³. Il a été cependant réalisé au Japon des sphères de 17 000 m³ sous 225 hpz.

Il existe également des batteries de gazomètres pour le stockage des gaz liquéfiés du pétrole. Ces réservoirs ont aussi une capacité limitée : 5 000 m³ pour le butane et 2 000 m³ pour le propane.

Devant les limites actuelles et le coût des réservoirs aériens, les pétroliers ont cherché d'autres techniques, ils utilisent maintenant les stockages souterrains.

Parallèlement, des recherches ont été effectuées en vue de stocker des produits pétroliers au coût minimal. Ainsi, aux États-Unis, une carrière abandonnée munie d'un toit flottant a été utilisée pour les produits noirs. De même, au Venezuela, un réservoir fut creusé en terre pour le stockage des huiles.

Stockages souterrains

L'expression *stockage souterrain* désigne l'opération qui consiste à emmagasiner des hydrocarbures dans une cavité ou un réservoir artificiellement aménagé à une certaine profondeur dans le sol, et par extension, elle désigne la cavité elle-même.

C'est en Europe, en 1916, qu'on eut l'idée de stocker des hydrocarbures dans une cavité artificielle creusée sous terre. La guerre empêcha la mise en pratique de cette idée. Elle fut reprise beaucoup plus tard, au Canada, sans plus de résultat. Ce n'est qu'en 1950, aux États-Unis, qu'elle fut enfin mise en pratique et que le premier stockage souterrain fut réalisé en terrain rocheux par Fenix et Scisson pour Warren Petroleum Corporation.

La première cavité creusée dans le sel par dissolution a été utilisée vers 1951, pour y stocker des gaz liquéfiés.

Une première classification, faisant appel à la géologie, permet de distinguer :

— les stockages réalisés dans des formations poreuses et perméables profondes, telles qu'anciens gisements de gaz ou de pétrole abandonnés, ou formations constituées de sables aquifères offrant des garanties d'étanchéité à leur sommet;

— les stockages réalisés par excavation près de la surface, dans des formations poreuses et perméables aquifères, dont les parois sont gelées pour en assurer l'étanchéité;

— les stockages souterrains de tous types, réalisés dans des cavernes artificielles, obtenues par excavation ou dissolution dans des roches imperméables.

Les premiers conviennent uniquement au stockage des hydrocarbures gazeux, car il ne pourrait être question d'y mettre des hydrocarbures liquides ou liquéfiés pour deux raisons principales : les pertes inévitables par absorption et saturation résiduelle irréductible pouvant atteindre, surtout pour les liquides, des valeurs inacceptables; les difficultés de mise en place et de soutirage avec des débits élevés en milieu perméable.

Les seconds, en raison de leur mode d'étanchéité et des prix de revient qui en découlent, ne conviennent qu'aux gaz liquéfiés stockés à très basse température.

Les troisièmes conviennent, en revanche, au stockage de tous les types d'hydrocarbures gazeux, liquéfiés ou liquides, aux conditions de température et de pression du stockage.

Ces conditions exigent de la roche dans laquelle la cavité doit être creusée des caractéristiques mécaniques suffisantes pour que la cavité ne s'effondre pas (dimensions limitées de la cavité), une bonne tenue à l'air, l'inaltérabilité et l'étanchéité au produit stocké et une épaisseur suffisante de morts terrains au-dessus de la cavité, compte tenu de la pression devant exister dans la cavité.

A l'inverse des stockages aériens, la taille unitaire des cavités souterraines est pratiquement sans limite (couramment 300 000 m³).

Une fois le stockage terminé, les installations de surface, peu nombreuses, n'occupent qu'une faible superficie (pompes, organes annexes, bâtiments). Ce mode de stockage répond bien au souci de sécurité qui est fondamental; il donne également une réponse élégante aux préoccupations d'esthétique et d'environnement qui prennent une importance croissante. Seule, la structure géologique limite la capacité finale du parc de stockage.

Les stockages souterrains ne présentent pas que des avantages. Leurs inconvénients sont liés à leur nature même : ils ne peuvent être réalisés que dans des sites particuliers qui ne se trouvent pas forcément à proximité des raffineries et des grands centres de consommation; ils doivent donc être raccordés à une infrastructure pétrolière par un pipe-line, ou un réseau de pipe-lines, qui permette les différents mouvements de remplissage et de vidange. Ainsi, le stockage de Manosque est relié au complexe pétrolier de l'étang de Berre par un pipe-line d'une longueur de 97 km qui permet les mouvements de produits et de saumure. Les problèmes de rejet de saumure ou d'amenée et de rejet d'eau imposent également des liaisons importantes et des installations d'épuration (May-sur-Orne). Les investissements représentés par le pipe-line et les installations secondaires doivent être répartis sur une grande capacité pour ne pas grever le coût au mètre cube, sauf site exceptionnel ou stockage de gaz. Les mouvements de produits et de saumure augmentent de façon importante les frais d'exploitation s'ils sont fréquents, ce qui confine les stockages souterrains dans un rôle de modulation et surtout de réserve.

* *Stockages réalisés dans des formations poreuses et perméables profondes*

Le principe du stockage souterrain en nappe aquifère profonde consiste à injecter du gaz dans les vides interstitiels de la roche, de façon à reconstituer, en quelque sorte, un gisement de gaz naturel. La mise en œuvre de cette technique impose les conditions géologiques mentionnées ci-dessus.

En France, il existe peu de sites où se trouvent réunies toutes les conditions favorables, et c'est dans le Bassin parisien que les recherches ont donné les résultats les plus intéressants.

* *Stockages dans le sel*

De telles cavités sont réalisables dans des couches de sel (Viriat) ou dans des dômes de sel (Manosque). Les différentes phases d'un projet de stockage dans le sel se déroulent dans l'ordre suivant :

études géologiques pour vérifier la qualité du sel rencontré et choisir le site exact;

exécution du puits d'exploitation (sa bonne réalisation est un facteur déterminant pour une exploitation saine);

mise à disposition d'eau douce et évacuation de la saumure; celle-ci est un problème que l'on peut résoudre par : rejet dans une rivière par un pipe-line provisoire (Viriat), ou définitif, rejet en mer ou en étang marin (Manosque); utilisation de la saumure comme matière première industrielle (Hauterives); injection de la saumure dans un autre puits situé dans une structure favorable;

réalisation de certaines installations de surface (pompe à saumure);

creusement de la cavité par injection d'eau douce et rejet de saumure;

finition des installations de surface (sécheurs, bassins de saumure, etc.). Certains gaz sortant des cavités sont humides et doivent être séchés avant utilisation.

La perméabilité est très faible et le taux de récupération du produit est excellent; ainsi, le très faible coût au mètre cube et la profusion des dépôts salifères expliquent le développement de ce mode de stockage.

* *Stockages réalisés par excavation près de la surface*

Dans les régions où il n'y a pas de couches ou de dômes de sel, les cavités sont creusées dans des roches convenables, à des profondeurs généralement inférieures à 150 m. Le choix du terrain et la profondeur à laquelle sera creusée la cavité sont déterminés par les mêmes impératifs que ceux régissant les autres stockages. La cavité est généralement constituée par une série de galeries qui se coupent à angle droit dans des terrains comme des calcaires marneux ou des marnes, qui n'ont pas une grande résistance mécanique et, quelquefois, par une véritable caverne dans des roches dures comme le granite.

Les dimensions des galeries de Petit-Couronne (Shell) près de Rouen, pour le stockage des gaz du pétrole liquéfiés, sont de 4 × 5,50 m dans la craie grise du Turonien. Le volume utile des galeries est de 65 000 m³.

En Suède, des cavités de 21 × 24 × 163 m ont été creusées dans du granite à 20 m sous le sol pour stocker du

brut. Deux types de cavités ont été réalisés : le système à niveau d'eau variable ; le système à niveau d'eau fixe, de manière à éviter toute pollution de la nappe phréatique par le produit stocké.

* *Stockages dans des cavités réalisées par explosion nucléaire*

Certaines régions n'offrent ni couches de sel, ni couches rocheuses convenables à faible profondeur. Les moyens mécaniques actuels ne permettant pas de creuser à grande profondeur une cavité de volume important, on a songé à utiliser une explosion nucléaire.

Les puissances envisagées pour les explosions souterraines à caractère scientifique sont actuellement de 20 à 500 kT (à titre d'exemple la bombe A d'Hiroshima avait une puissance de 20 kT). Les problèmes de sécurité prennent une importance primordiale (radio-activité et onde sismique). Une période d'attente de 10 à12 mois est considérée comme nécessaire, tant pour le refroidissement que pour l'atténuation de radio-activité des éléments de fission produits par la détonation. Une charge nucléaire de 20 kT placée à la profondeur de 1 000 m doit créer un volume utilisable d'environ 80 000 m^3. Cette technique n'a pas pour le moment dépassé le stade expérimental.

* *Réutilisation des mines désaffectées*

Certaines mines désaffectées peuvent être utilisées pour stocker des hydrocarbures (mines de charbon en Afrique du Sud, mines d'ardoise aux États-Unis). En France, la réutilisation des mines de fer de May-sur-Orne (près de Caen) est étudiée. Dans la cavité existante, il faut s'assurer que la roche est d'une qualité satisfaisante et qu'elle répond aux mêmes impératifs que ceux retenus dans les autres cas. L'exploitation est la même que pour un stockage en cavités excavées.

* *Le stockage sous terrain cryogénique*

Le transport des gaz pétroliers, puis du gaz naturel se fait de façon très économique s'ils sont liquéfiés : le volume est moindre et le transport est plus rentable. Les arguments sont un peu moins impératifs pour le stockage, dans la mesure où l'on dispose de cavités souvent énormes et dont l'équipement cryogénique est hors de propos pour des raisons financières. Aussi, dans un certain nombre d'installations, le gaz était-il transporté liquéfié, puis stocké sous forme gazeuse comprimée.

Cependant, avec les progrès des techniques de basses températures et la mise au point de nouveaux matériaux cryogéniques, métaux ou isolants, il est devenu rentable de stocker des hydrocarbures liquéfiés dans des réservoirs dont le volume relativement faible au départ ne cesse de s'accroître. Il en existe plusieurs sortes :

— *Réservoirs souterrains en terre gelée*. Cette technique utilise la formation d'une barrière de glace dans la « fosse citerne », qui empêche les fuites de liquide et agit en même temps comme matière isolante.

Il en existe deux types : la *cavité en sol gelé*, recouverte d'un toit artificiel imperméable au gaz et convenablement isolée ; la *caverne gelée entièrement* située dans le rocher. Dans la mesure où le sol répond bien à certaines conditions, ce procédé semble légèrement moins cher et nettement plus sûr que celui par réservoirs métalliques.

— *Réservoirs en béton précontraint*. On a mis au point en France et aux États-Unis des réservoirs en béton précontraint (avec parfois un toit métallique) construits soit au-dessus, soit au-dessous du sol. L'avantage de ce genre de stockage est d'être bon marché et de présenter peu de pertes thermiques.

— *Réservoirs métalliques*. Le stockage d'hydrocarbures liquéfiés se fait couramment au moyen de réservoirs métalliques cryogéniques, généralement construits sur le sol, mais qui, à la rigueur, peuvent être enterrés.

Ces réservoirs présentent de nombreux avantages : pas de limitation géographique, technologie éprouvée, faible perte thermique, durée de vie et prix de revient bien connus à l'avance, pas de difficulté pour la maintenance ou l'accessibilité, bonne sécurité.

Nous avons déjà noté que les réservoirs aériens d'hydrocarbures gazeux avaient une capacité limitée alors que la taille des stockages souterrains dépasse couramment 200 000 m^3. Ainsi, le stockage souterrain de propane de Lavera a une capacité de 120 000 m^3 — à comparer aux sphères de propane de 2 000 m^3.

Les stockages souterrains conduisent à des coûts de stockage nettement inférieurs à ceux des stockages aériens.

Du fait du développement du chauffage, le marché du gaz est marqué par une augmentation des besoins d'hiver plus rapide que celle des besoins d'été et de demi-saison, par l'importance des consommations journalières de pointe en hiver, ainsi que par la sensibilité de ces besoins saisonniers et journaliers aux aléas météorologiques. Pour permettre l'étude technico-économique des équipements nécessaires, il faut connaître l'influence de la température sur les émissions, afin d'établir une représentation statistique des émissions probables au cours de chaque exercice gazier. Les stockages souterrains peuvent permettre de faire face aux besoins de pointe.

Stockages en mer

Parallèlement à la production en mer, la technologie des stockages s'est également développée et se modifie avec l'accroissement des profondeurs.

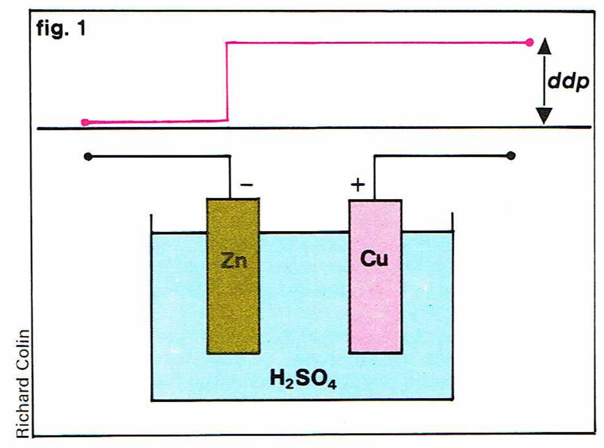
Les stockages géants avec leurs murs brise-lames (type Doris) ne sont plus envisageables à partir d'une certaine profondeur d'eau. Elf a développé la technique des stockages articulés sur un cardan reposant sur le fond et relié à des bouées de chargement en mer. Pour les très grandes profondeurs, il faut envisager des stockages entièrement sous-marins, reliés à des plates-formes semi-submersibles de chargement et de traitement de la production.

Certains champs de faible taille ne peuvent être développés, parce qu'il n'est pas rentable de construire un réseau de pipe-lines et un terminal à terre. Dans ce cas, le stockage sur place est la seule solution.

Le volume du stockage doit être calculé en tenant compte de la capacité de production du champ, de la taille des pétroliers géants ainsi que des conditions météorologiques dans la région considérée. Dans les régions éloignées, il est bon de prévoir un volume de stockage égal au moins à dix jours de production du champ. Ainsi, pour un champ produisant 16 000 m^3/j, il faut prévoir un stockage de 160 000 m^3. Là aussi, la technologie actuelle impose une limite à l'accroissement des capacités de stockage. En effet, un réservoir doit être construit à terre, puis remorqué jusqu'au champ et coulé, ce qui ne va pas sans poser de sérieux problèmes. Actuellement, il existe des stockages sous-marins d'une capacité de 80 000 m^3 par 45 m de fond.

Il est certain que la construction de navires pétroliers géants et de ports pétroliers en haute mer nécessitera de plus en plus la construction de réservoirs semi-immergés, mais surtout sous-marins à l'abri des tempêtes.

En ce qui concerne le gaz naturel, une solution intéressante est le stockage au fond des lacs ou des océans. L'élément liquide offre des avantages considérables par rapport aux méthodes classiques de stockage souterrain :
— il donne un plus grand volume de stockage pour le même volume brut (porosité 100 %) ;
— la pression nécessaire au stockage existe déjà ;
— les problèmes de sécurité, de fuites, de récupération et de contamination sont réduits au strict minimum ;
— la température constamment basse au fond de l'océan permet de stocker des quantités de gaz plus importantes, pour une même pression et une même profondeur ;
— la présence d'eau salée empêche la formation d'hydrates ;
— il est possible de pratiquer le mise en surpression de récipients spéciaux, de façon beaucoup plus étendue que dans le stockage souterrain.



▶ ***Figure 1 : schéma de principe de la* pile Volta.**

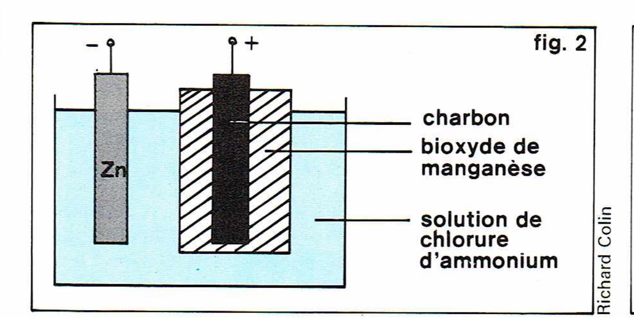


fig. 3
Cu
Zn
solution de $CuSO_4$
$ZnSO_4$
vase poreux
cristaux de $CuSO_4$
cristaux de $ZnSO_4$
Richard Colin

◀ *Figure 2 : schéma de principe de la* pile Leclanché.
Figure 3 : schéma de principe de la pile Daniell.

Stockage d'énergie électrique

Piles

Une pile est un système électrochimique qui transforme une énergie chimique en énergie électrique. Son fonctionnement est fondé sur le principe que toute chaîne de conducteurs ouverte, qui n'est pas symétrique, présente entre ses extrémités une différence de potentiel. Cette dissymétrie peut être due à des différences de concentration des solutions, à des différences de nature des conducteurs, à des différences de température de la chaîne.

Piles hydro-électriques

Le système est composé d'un électrolyte dans lequel plongent deux électrodes de nature différente. Comme dans le cas précédent, c'est toujours cette dissymétrie qui est génératrice de la d.d.p. qui apparaît entre les bornes et est appelée force électromotrice (f. é. m.). Cette f. é. m. dépend de la nature de l'électrolyte et des électrodes, mais non de leur forme ni de la distance qui les sépare. Par contre, d'autres facteurs varient avec ces critères.

* *Pile Volta*

C'est la plus simple. Elle est constituée d'électrodes en zinc et en cuivre qui plongent dans une solution d'acide sulfurique (*fig.* 1). La différence de potentiel est de l'ordre du volt. Quand un courant circule, il se dégage de l'hydrogène à la cathode. A l'anode, il y a un transfert du zinc dans la solution sous forme d'ions Zn^{2+}. La réaction chimique se fait suivant l'équation :

$$Zn + 2\,H^+ \rightarrow Zn^{2+} + H_2\nearrow.$$

Quand la pile débite un courant, sa f. é. m. diminue très rapidement, car un écran gazeux isolant d'hydrogène se place dans la chaîne et vient s'intercaler entre le cuivre et l'électrolyte. Ce phénomène a été expliqué par A. Becquerel en 1826. Le débit est pratiquement arrêté : la pile est polarisée. Pour obtenir à nouveau des caractéristiques identiques à celles d'origine, il faut nettoyer très sérieusement l'électrode en cuivre. Cela empêche toute utilisation industrielle, c'est pourquoi on a trouvé une solution à dépolarisant : on introduit dans l'électrolyte une matière oxydante qui empêche la formation d'hydrogène sur la cathode.

* *Pile Leclanché*

Elle comporte une électrode positive en charbon noyée dans du bioxyde de manganèse MnO_2 qui oxyde l'hydrogène dès sa formation et annule l'écran gazeux isolant (*fig.* 2). L'électrode négative est en zinc, noyée dans une solution de chlorure d'ammonium. A l'anode, il y a transfert de zinc dans la solution sous forme d'ions Zn^{2+}. A la cathode, il se produit une ionisation ; l'équation chimique est : $2\,MnO_2 + 2\,H \rightarrow Mn_2O_3 + H_2O$.

De l'ammoniaque se forme et de l'hydrogène se dégage, qui est oxydé par le bioxyde de manganèse ; cette oxydation n'est pas immédiate. Quand la pile fonctionne longtemps, une polarisation prend naissance, c'est pourquoi il faut la laisser en circuit ouvert un certain temps pour permettre à l'oxydation de se produire. Ces piles sont couramment employées sous forme de piles sèches dans lesquelles l'électrolyte est une pâte semi-fluide réalisée par gélification. L'anode est un tube qui sert d'enveloppe à la pile, la cathode est toujours un crayon de charbon. La tension de la pile est d'environ 1,5 volt. Sa capacité est faible ainsi que les courants qu'elle forme (*fig.* 5) ; les substances qui la constituent ne sont pas dangereuses ; c'est pourquoi son utilisation est limitée aux appareils d'éclairage de poche, aux récepteurs de radio, aux jouets, etc.

* *Pile Féry*

La pile Féry est un élément Leclanché perfectionné, car sa dépolarisation, plus rapide, se fait par l'oxygène de l'air. L'électrode en zinc est placée au fond du bac et n'est pas attaquée par l'oxygène de l'air, ce qui réduit son usure. Par rapport à la pile Leclanché, elle offre une capacité plus importante et une tension plus stable entre le début et la fin de la décharge.

* *Pile Daniell*

La pile Daniell est impolarisable. Chaque électrode est plongée dans un sel de son métal. L'une est en cuivre et plonge dans une solution de sulfate de cuivre, l'autre est en zinc et plonge dans une solution de sulfate de zinc (*fig.* 3). Les deux électrolytes sont séparés par un vase poreux qui n'interrompt pas le passage du courant et qui évite le mélange des solutions. La chaîne chimique est :

$$Zn—ZnSO_4—CuSO_4—Cu.$$

Le sulfate de zinc est régénéré sur la cathode et sur la paroi poreuse, le passage du courant ne modifie pas les électrodes. Le sulfate $CuSO_4$ n'est pas régénéré, mais décomposé. Pour remédier à cette diminution de la concentration de la solution, on la sature en plaçant des cristaux de sulfate de cuivre au fond du vase contenant la cathode.

Cette pile est remarquable par la constance de sa force électromotrice à circuit ouvert. De ce fait, on l'emploie comme pile-étalon.

* *Pile Weston*

La constante de sa f. é. m. à vide est remarquable. A 20 °C, elle est égale à 1,018 3 volt. La chaîne de cet élément impolarisable est : $Hg—Hg_2^{2+}SO_4^{2-}—Cd^{2+}SO_4^{2-}—Cd$.

* *Pile au mercure*

L'électrode négative est du zinc, l'électrode positive une poudre d'oxyde de mercure, l'électrolyte une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium KOH saturée de zincate de potassium $ZnOK_2$ (*fig.* 4). Sa f. é. m. est égale à 1,35 volt, variable avec la nature de l'électrolyte et des électrodes.

Quand elle débite un courant, les ions Hg^{2+} de l'électrode positive sont neutralisés et il y a formation de mercure, qui n'est pas un obstacle au passage du courant. L'électrode reçoit des ions OH^-, il y a formation d'eau et d'oxyde de zinc. La formation de mercure au niveau de la cathode n'empêche pas la conduction, la pile est donc impolarisable. Sa capacité est bien supérieure à celle d'une pile Leclanché, approximativement quatre fois plus pour le même volume (*fig.* 5). Elle conserve très longtemps ses caractéristiques. Son emploi est particulièrement recommandé pour les utilisations miniatures : prothèses auditives, stimulateurs cardiaques internes au corps, automatismes des appareils photographiques. Elle se présente sous forme de cylindre ou en pastille.

* *Pile alcalinée au manganèse*

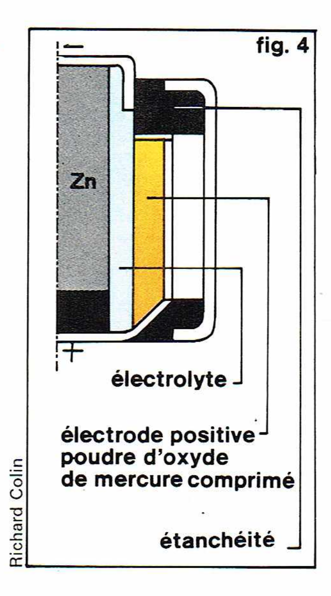
Cette pile est comparable à l'élément Leclanché, mais l'électrolyte est une solution d'hydroxyde de potassium. L'électrode positive est un mélange de carbone et de bioxyde de manganèse. Quand elle débite un courant, il se forme sur l'électrode négative de l'hydroxyde de zinc, et sur l'électrode positive un dégagement d'hydrogène se produit. Le bioxyde de manganèse joue le rôle d'antipolarisant. Cette pile se présente sous la même forme que la pile sèche Leclanché, étanche, ce qui permet de l'utiliser couramment sans précautions spéciales. Sa force électromotrice est 1,5 volt. Sa capacité énergétique est le double de celle d'une pile Leclanché et sa durée de vie trois à cinq fois supérieure (*fig.* 5). Sa résistance interne est faible, ce qui permet de l'utiliser pour des fortes intensités de façon continue.



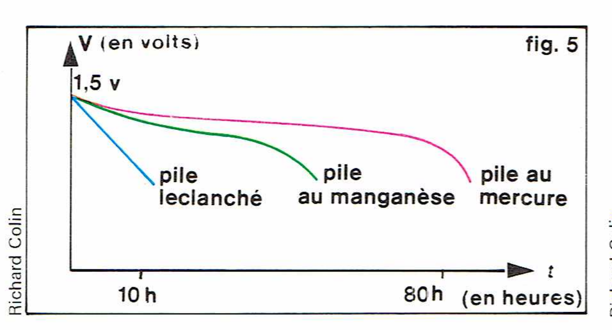
T. Poggio

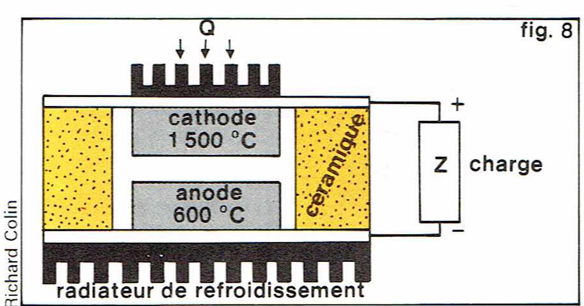
▲ *La pile de Leclanché, brevetée en 1866 ; c'est le précurseur de la pile sèche moderne (British Museum of Sciences, Londres).*

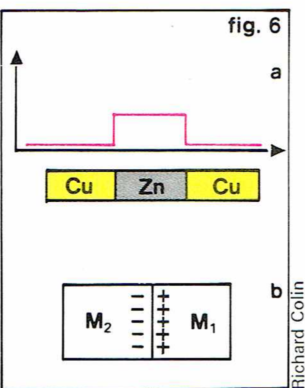
▼ *Figure 4 : schéma de principe de la* pile au mercure.



▶ *Figure 5 : comparaison des capacités énergétiques et des durées de vie de trois types de piles : Leclanché, au manganèse et au mercure.*
Figure 8 : schéma de principe de la pile thermo-ionique.

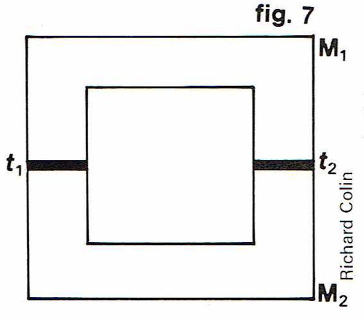






▲ *Figure 6 :*
a) *représentation schématique d'une chaîne ouverte de conducteurs, et différence de potentiel entre ces conducteurs ;*
b) *explication de cette d.d.p. par le transfert des électrons.*

▼ *Figure 7 : principe de la* pile thermo-électrique *: association de deux conducteurs M_1 et M_2 différents dont les soudures sont portées à des températures t_1 et t_2.*



* *Autres piles*

Nous pouvons citer pour mémoire : la pile à chlorure d'ammonium dont l'électrode positive est un mélange de charbon de bois et de graphite, l'électrode négative du zinc laminé et l'électrolyte une solution de chlorure d'ammonium immobilisé avec de la farine.

La pile à la soude, dont l'électrode positive est un aggloméré à base de charbon de bois, l'électrode négative du zinc fondu amalgamé et l'électrolyte une solution de soude immobilisée.

Les piles à oxyde de cuivre à la soude, dont l'électrode positive est de l'oxyde de cuivre, l'électrode négative du zinc fondu et l'électrolyte de la soude immobilisée.

Piles thermo-électriques

Toute chaîne de conducteurs ouverte, dissymétrique, présente une différence de potentiel entre ses extrémités.

Mettons en présence deux conducteurs de nature différente : du cuivre et du zinc. On relève entre ces deux métaux une différence de potentiel de l'ordre du millivolt. Si la chaîne est prolongée par du cuivre, la différence de potentiel entre les deux plaques extrêmes, de même nature, est nulle (*fig.* 6).

Ce phénomène s'explique de la façon suivante : soit deux métaux M_1 et M_2 qui ne possèdent pas le même nombre d'électrons libres par unité de volume. Quand on les met en contact, il y a transfert des électrons du métal qui en possède le plus vers le métal qui en possède le moins. Si le transfert a lieu de M_1 vers M_2, M_1 devient positif et M_2 négatif. Insérons cette chaîne dans un circuit et considérons que le courant se propage de M_2 vers M_1. La jonction est un générateur qui, pour jouer son rôle, doit absorber une autre énergie. Dans le cas considéré, l'énergie absorbée est calorifique et a lieu à la jonction. Si cette chaleur est supérieure à RI^2/J (R résistance de la jonction, J équivalent mécanique de la calorie), la soudure se refroidit : ce phénomène est appelé *effet Peltier*. En cas d'inversion du sens de circulation du courant, la soudure s'échauffe.

Si maintenant nous portons à des températures différentes deux points d'un même conducteur, il apparaît entre ces deux points une différence de potentiel : c'est l'*effet Thomson*.

L'association de ces deux phénomènes est l'*effet Seebeck* qui donne naissance à la pile thermo-électrique ou thermopile. Considérons une chaîne fermée, formée de deux métaux différents soudés M_1 et M_2 (*fig.* 7). De par l'effet Peltier, il existe au niveau de chaque jonction une différence de potentiel. Portons les soudures à des températures t_1 et t_2. De par l'effet Thomson, pour chaque conducteur, prend naissance une force électromotrice. Ces deux effets conjugués engendrent une force électromotrice résultante E qui fait circuler un courant I. On a réalisé un générateur thermo-électrique dont la force électromotrice n'est fonction que de la différence de température des deux soudures. Sur l'une on apporte de la chaleur, sur l'autre on en retire. Ces quantités de chaleur sont proportionnelles à l'intensité qui traverse les jonctions. A ce sujet, Becquerel a établi une loi importante : « La force électromotrice thermo-électrique agissant dans un circuit n'est pas modifiée si on intercale dans le circuit un ou plusieurs métaux intermédiaires, pourvu que tous ces métaux soient à la même température ». On peut donc interposer entre deux métaux un troisième métal qui n'aura pas d'influence sur la force électromotrice thermo-électrique.

Les tensions recueillies sont de quelques millivolts pour les températures couramment utilisées. Ces tensions très faibles limitent l'emploi de ces piles à la mesure des températures. La thermopile est alors appelée thermocouple.

La force électromotrice relevée est égale à $E = \alpha\,(t_c - t_f)$, où α est le coefficient de Seebeck ou pouvoir thermo-électrique d'un des métaux constituant la jonction par rapport à l'autre métal, t_c la température de la soudure chaude et t_f celle de la soudure froide.

L'emploi de semi-conducteurs permet d'obtenir des f. é. m. de quelques millivolts par degré Celsius. Les plus utilisés sont les alliages germanium-silicium et le tellurure de plomb. On peut utiliser l'énergie nucléaire comme dans les générateurs « Systems for Nuclear Auxiliary Power », mais ils sont limités par une décroissance dans le temps de l'activité de l'isotope radio-actif qui donne naissance à cette énergie et par les volumes et masses des dispositifs de protection. Des générateurs de ce type d'une puissance de 10 kW ont été construits et il ne semble pas que des puissances supérieures aient été atteintes. En revanche, en liaison avec un réacteur nucléaire, on peut atteindre quelques dizaines de kW.

Piles thermo-ioniques

L'*effet thermo-ionique* a pour origine l'émission d'électrons, à partir d'une cathode chauffée à haute température, qui sont recueillis sur une anode froide. Il a été découvert en 1884 par A. Edison. Cette émission est fonction de la température et croît quand on applique un champ électrique extérieur. La cathode est portée à des températures comprises entre 1 000 et 1 500 °C, pouvant atteindre parfois 2 000 °C (*fig.* 8). C'est une conversion directe de l'énergie thermique en énergie électrique. La densité de courant de saturation est donnée par l'équation de Richardson

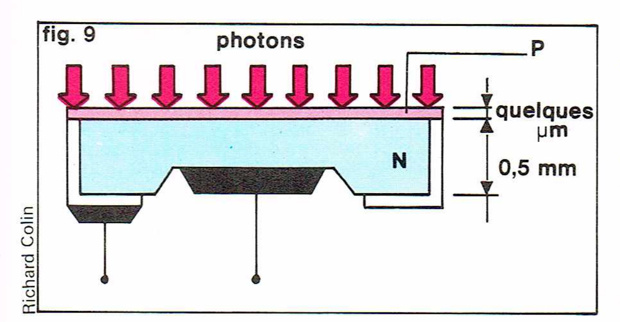
$$J = AT^2 e^{\frac{-e\beta}{kT}}$$

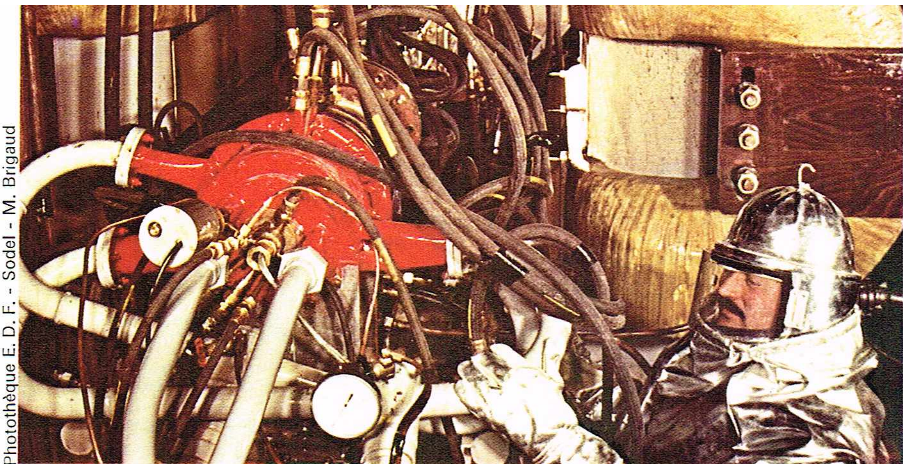
A et β sont des constantes qui dépendent du matériau qui constitue la cathode, T est la température absolue, e la charge de l'électron, k la constante de Boltzmann. β est le travail d'extraction ; il représente l'énergie qu'il est nécessaire de fournir à un électron pour l'amener du niveau de Fermi à l'état de repos dans le vide. β est de l'ordre de 5 électrons-volts pour les métaux suivants : fer, molybdène, cuivre, aluminium. On rencontre deux types principaux de convertisseurs thermo-ioniques. Dans les premiers, la distance entre l'anode et la cathode est réduite à quelques centièmes de millimètre, sous vide. Dans les seconds, cette distance est plus importante, mais l'on introduit un corps à l'état de vapeur, généralement du césium. Ces dispositions ont pour but d'éliminer la charge d'espace qui se forme autour de la cathode et qui limite le fonctionnement.

Les électrons recueillis par l'anode traversent la charge et retournent à la cathode. Les cathodes sont constituées de matériaux réfractaires qui ont un travail d'extraction élevé. Par contre, les anodes doivent avoir un travail d'extraction faible. Les résultats que l'on obtient actuellement, avec les piles à vide, sont de l'ordre de 4 W/cm² pour une température de cathode de 1 300 °C et 8 W/cm² pour 1 800 °C ; le rendement est de 0,20. Avec les piles à plasma, les résultats sont supérieurs : 10 W/cm². Des appareils de 100 W fonctionnent avec des rendements de 0,15. Ce sont des appareils robustes qui sont utilisés dans les véhicules spatiaux à partir de l'énergie thermique solaire.

Piles photovoltaïques

Certains corps soumis à un rayonnement lumineux émettent des électrons : c'est la photo-émission, appelée *effet photo-électrique externe*, découvert par Hertz en 1887. Sur d'autres corps, on enregistre une variation de la résis-





tivité : c'est la photoconduction, ou *effet photo-électrique interne*. Enfin, sous un bombardement de photons, une force électromotrice apparaît entre deux semi-conducteurs mis en contact : c'est l'*effet photovoltaïque*.

La photo-émission et la photoconduction ne sont pas à l'origine d'effets générateurs de courant au sens où nous l'entendons dans ce chapitre. En effet, une émission de photons sur une cathode de tube photo-électrique à vide, par exemple, provoque une émission d'électrons qui est recueillie par l'anode si elle est portée à un potentiel positif par rapport à la cathode à l'aide d'une source extérieure. Il en est de même des tubes photo-électriques à gaz, des photomultiplicateurs, des photorésistances. Par contre, l'effet photovoltaïque entre parfaitement dans le cadre des générateurs.

Cet effet a lieu quand on éclaire une jonction de conducteurs ou de semi-conducteurs sans qu'il y ait besoin de source extérieure. Ce phénomène s'explique de la façon suivante : à l'état d'équilibre, sans émission de photons, les niveaux de Fermi sont alignés. L'arrivée de photons sur la jonction crée des paires électrons-trous par absorption, les trous sont entraînés vers la partie *p* et les électrons libres vers la partie *n*. Si Np est le nombre de photons et e la charge d'un électron, le courant qui a pour origine Np photons par seconde est inférieur à Npe, car les photons ne sont pas tous absorbés (*fig.* 9).

Les matériaux les plus employés sont le silicium, l'arséniure de gallium GaAs, le séléniure de cadmium CdSe, le sulfure de cadmium CdS. Ce sont des semi-conducteurs dont l'énergie d'activation intrinsèque est comprise entre 1 et 1,6 eV. Le rendement est assez faible : 0,10. Ces cellules sont couramment employées dans les satellites et véhicules spatiaux, qui sont dans certains cas recouverts sur une grande partie de leur surface de plaquettes de silicium (actuellement, on atteint 100 W/m² pour une masse de 2 kg) ; ces satellites sont alimentés par des panneaux qui atteignent parfois 8 à 9 m² et comportent des dizaines de milliers de cellules. Ces cellules servent à charger des accumulateurs classiques qui fournissent l'énergie au cours des traversées des zones sombres. Elles offrent l'avantage d'être statiques, fiables et simples à mettre en exploitation. Plusieurs centrales solaires fonctionnent et donnent toute satisfaction, mais les surfaces à recouvrir sont considérables si l'on veut obtenir une puissance raisonnable.

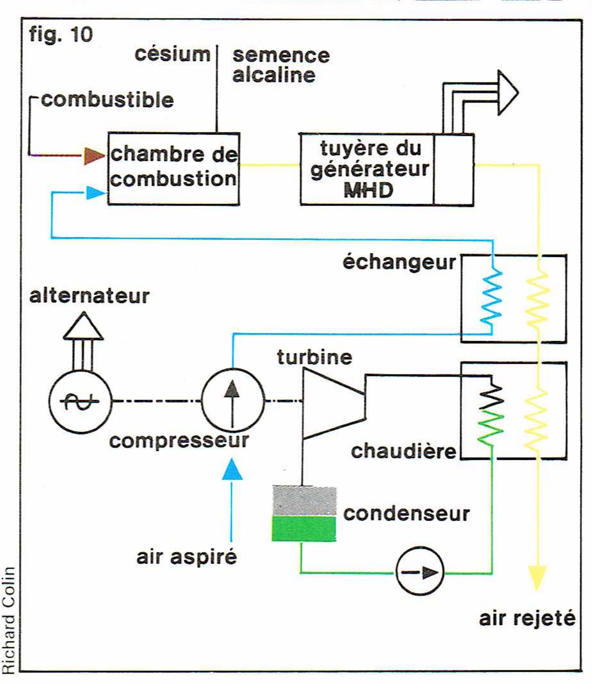
Un calcul simple montre que, pour remplacer une centrale électrique de 900 MWe, il faudrait

$$\frac{900 \cdot 10^6}{100} = 9 \cdot 10^6 \text{ m}^2 \text{ de cellules}$$

soit un carré de 3 km de côté. Elles équipent également des luxmètres et des posemètres.

Générateur magnéto-hydrodynamique (MHD)

La magnéto-hydrodynamique est une conversion directe de l'énergie thermique en énergie électrique en présence d'un champ magnétique. Un fluide combustible, porté à haute température, est partiellement ionisé et animé d'une grande vitesse. L'ionisation indique qu'il contient des charges électriques : électrons négatifs et ions positifs. Ce gaz traverse un champ magnétique intense qui provoque la déviation, donc la séparation, des charges suivant une direction perpendiculaire au vecteur induction. Des électrodes recueillent ces charges. L'air de combustion doit être comprimé, réchauffé, traverser la chambre de combustion, puis être refroidi dans un échangeur de chaleur. La pression et la température doivent être élevées sous peine de ne transporter qu'un faible flux d'énergie. L'air ainsi réchauffé et comprimé est mélangé au fuel, ou au charbon,



A gauche, figure 9 : schéma de principe de la pile photovoltaïque. En haut, le générateur magnéto-hydrodynamique (générateur MHD) du laboratoire E. D. F. des Renardières.

◀ *Figure 10 : schéma de fonctionnement d'un générateur MHD à circuit ouvert.*

ou au gaz. Quelquefois, pour obtenir des températures suffisantes, on suroxygène l'air.

La *figure* 10 représente le schéma de fonctionnement d'un générateur MHD à circuit ouvert : l'air de combustion est prélevé à l'extérieur et rejeté à l'extérieur après usage. Cet air est comprimé avant de passer dans un échangeur de chaleur qui élève sa température. Un brûleur le mélange au combustible. Après combustion, le mélange traverse l'échangeur et la chaudière, puis est rejeté à l'extérieur. Le compresseur est entraîné par une turbine alimentée en vapeur par la chaudière. L'excédent de puissance est transformé en énergie électrique par un alternateur placé en bout d'arbre sur le compresseur.

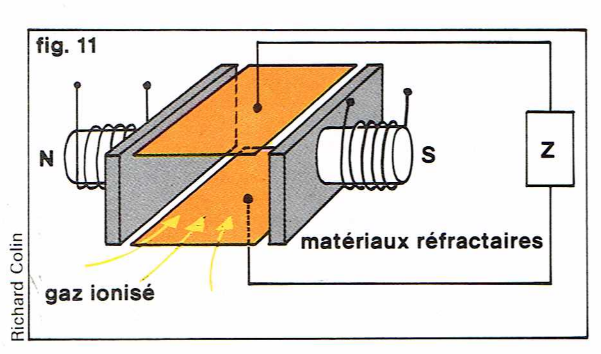
Pour obtenir le fonctionnement en cycle fermé, il suffit de faire une liaison entre le rejet et l'aspiration. Le gaz du cycle est de l'argon ou de l'hélium avec du césium. Au cours du cycle, les pressions varient entre 1 et 10 bars, les températures entre 1 800 et 3 000 °K.

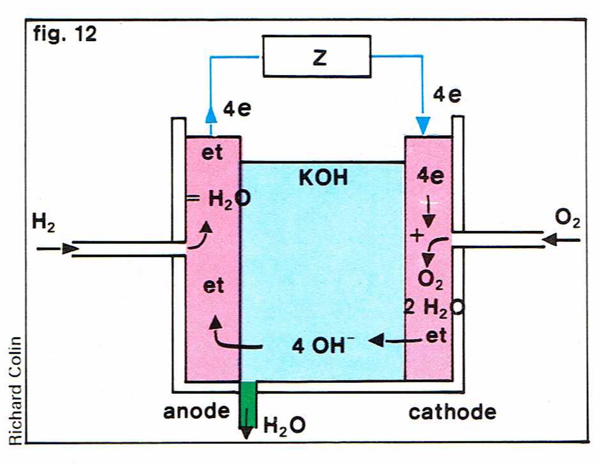
Reprenons les trois facteurs importants du fonctionnement : l'induction, la vitesse des gaz et leur ionisation. L'induction magnétique doit être de quelques dizaines de teslas. Cette valeur nécessite une mise en œuvre particulière ; en effet, la puissance atteint souvent 1 000 kW à partir d'un ensemble transformateur-redresseur.

La chambre de combustion de faible section, environ 0,5 m², est parcourue par des gaz qui circulent à la vitesse de 1 000 m/s. Pour utiliser directement les systèmes triphasés, on a donné une forme hexagonale à la chambre. Sur trois côtés déphasés de $2\,\pi/3$, sont disposés trois enroulements générateurs du champ magnétique, et sur les trois autres côtés les électrodes. La vitesse d'éjection des gaz qui est atteinte dans les tuyères est de 1 000 m/s (*fig.* 11).

Pour l'ionisation des gaz, il n'est pas pensable, dans l'état actuel des techniques, d'utiliser un plasma (qui atteint des températures de plusieurs milliers de degrés Celsius à la surface du Soleil et quelques millions de degrés dans les étoiles), malgré les progrès réalisés ces dernières années dans les céramiques et alliages spéciaux. Il faut

▶ *Figure 11 : détail de la chambre de combustion d'un générateur* MHD. *Figure 12 : schéma de principe de la* pile à combustible hydrogène-oxygène.





injecter dans les gaz chauds un corps aisément ionisable aux températures comprises entre 1 000 et 1 800 °C. Le césium et le potassium satisfont à ces critères ; en effet, le césium perd facilement l'électron de la couche périphérique de ses atomes à sa température d'ébullition, 670 °C.

Piles à combustible

Une pile à combustible est une cellule électrochimique qui fournit une énergie électrique en courant continu basse tension à partir d'une transformation directe de l'énergie chimique d'un combustible courant en énergie électrique.

Le premier à démontrer la réversibilité de l'électrolyse fut W. Grove en 1839, puis en 1894 H. Davy et W. Grove et Ostwald réalisèrent les premières piles hydrogène-oxygène et charbon-oxygène. L'essor qu'ils étaient en droit d'attendre de ces piles fut considérablement ralenti par les polarisations importantes et l'absence de fiabilité. Les travaux ne devinrent positifs qu'après la Seconde Guerre mondiale. C'est aux environs de 1959 que plusieurs chercheurs de l'université de Cambridge réalisèrent une batterie de piles hydrogène-oxygène capable d'alimenter un chariot. En France, les études n'ont commencé qu'en 1960, grâce au Comité d'action scientifique de la Défense nationale. Depuis lors, ces piles sont entrées dans le domaine industriel, mais font toujours l'objet de recherches dans les laboratoires.

Principe de la pile à combustible hydrogène-oxygène

Elle se compose de deux électrodes poreuses entre lesquelles est placé un électrolyte liquide, qui est en général une solution de potasse. Une canalisation est branchée sur chaque électrode, l'une est alimentée par de l'oxygène comburant, l'autre par de l'hydrogène. Sur l'électrode alimentée par l'oxygène, il se produit la réaction : $O_2 + 2\,H_2O + 4e^- \rightarrow 4\,OH^-$ qui donne naissance à 4 ions OH^- et 4 électrons sont pris au circuit extérieur. Sur l'anode s'effectue l'oxydation du combustible $4\,OH^- + 2\,H_2 \rightarrow 4\,H_2O + 4e^-$ (*fig.* 12). Les ions OH^- se combinent avec les molécules d'hydrogène pour donner de l'eau et les électrons recueillis à la cathode sont renvoyés au circuit extérieur par l'anode. La réaction globale s'écrit : $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$.

Cette pile fonctionne comme une pompe à électrons. Elle est très utilisée dans les véhicules spatiaux, dans lesquels elle alimente les circuits en énergie électrique et les astronautes en eau. Au cours de l'expédition lunaire du programme Apollo, il y avait trois piles à combustible hydrogène-oxygène qui fournissaient une puissance de 1 500 W à 240 °C sous une pression de 4 bars. L'électrolyte était une solution de potasse à 85 %. La production d'eau était de 230 litres par semaine.

Dans les piles à combustible à membranes, on remplace l'électrolyte par un diaphragme de quelques millimètres d'épaisseur composé de résines artificielles comme le polystyrène sulfoné. Ce diaphragme ne laisse passer les ions que dans un seul sens et joue le rôle de semi-conducteur. D'autres diaphragmes ont la propriété d'être perméables à une polarité déterminée des ions. S'ils laissent passer les ions négatifs, on les appelle anioniques ; s'ils laissent passer les ions positifs, on les appelle cationiques. Dans le premier cas, la formation de l'eau a lieu à la jonction anode-électrolyte (diaphragme) [*fig.* 13]. Dans le second cas, la formation de l'eau a lieu à la jonction cathode-électrolyte (*fig.* 14). Si la membrane est constituée de deux membranes, une anionique et une cationique, la formation de l'eau a lieu au niveau de leur jonction.

Le calcul de la force électromotrice peut s'effectuer à partir de la formule de Nernst $V = V_0 - \frac{RT}{nF} nL \frac{AM^{n+}}{AM}$ dans laquelle n est le nombre d'électrons, A l'activité des éléments M et M^{n+}, V le potentiel réversible de l'électrode et V_0 le potentiel normal. Suivant le type de réaction, ce potentiel V_0 est donné par le *tableau* I en fonction de la température.

Quel que soit le type de pile, l'énergie libérée par la réaction se divise en énergie thermique et en énergie électrique. Cette dernière ne peut être intégralement récupérée, à cause des pertes par effet Joule et des pertes dues au phénomène de polarisation. On distingue trois sortes de polarisation :

— la polarisation d'activation qui a pour origine l'irréversibilité des phénomènes électrochimiques de la pile en fonctionnement. Ce phénomène est complexe du fait de processus multiples comme les transferts de charges, l'absorption et la désorption des réactifs chimiques ;

— la polarisation de concentration qui a pour origine un appauvrissement des concentrations ioniques près des

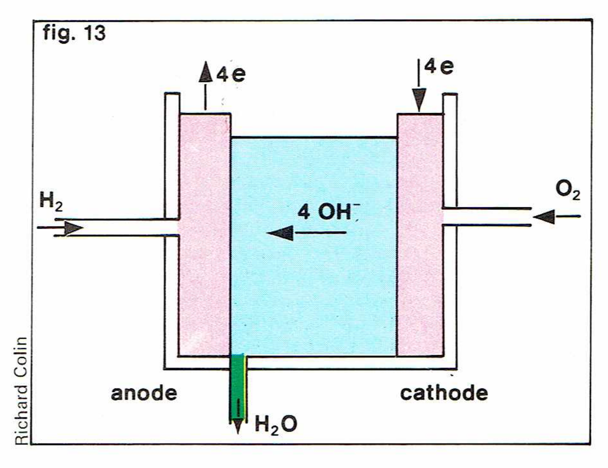


fig. 14
4e
4e
H2
4 H⁺
O2
anode
cathode
H2O
Richard Colin

▶ *Figure 13 : schéma de principe de la* pile à combustible à membrane anionique. *Figure 14 : schéma de principe de la* pile à combustible à membrane cationique.

électrodes quand la pile débite : c'est le phénomène de Hittorf ;

— la polarisation ohmique qui a pour origine la formation de couches à la surface des électrodes au cours des réactions électrochimiques et des modifications de la conductivité spécifique de l'électrolyte.

De nos jours, il existe de nombreux modèles de piles qui diffèrent les uns des autres : — par la nature de l'électrolyte qui peut être solide comme l'oxyde de zirconium ZrO_2, ou un sel fondu : chlorure, fluorure, carbonate, ou d'autres de consistance aqueuse ; — par le type de combustible qui peut être solide, liquide ou gazeux ; la tendance est d'utiliser des combustibles peu onéreux sous forme liquide : par exemple le méthanol et l'hydrazine ; — par la forme des électrodes ; — par les conditions de fonctionnement qui sont : basse pression, basse température (5 bars et 100 °C) ; haute pression, température moyenne (60 bars et 300 °C) ; hautes températures jusqu'à 800 °C.

Même si ces piles appartiennent encore au domaine de la recherche, elles possèdent un avenir certain et leur essor devrait être remarquable.

Piles biochimiques

Ce sont des piles de la même famille que celles décrites précédemment, dans lesquelles un des corps est obtenu par l'action de micro-organismes sur un combustible primaire constitué de matières organiques, ou de glucose, ou d'urée ou d'hydrates de carbone. Il se produit une transformation qui engendre un combustible secondaire gazeux, tel l'hydrogène, le méthane, ou l'ammoniac, ou liquide, tel l'éthanol. On voit l'intérêt que ces piles présentent dans les véhicules spatiaux, et pour la transformation des ordures ménagères.

Générateurs nucléaires

Ils ont pour principe la conversion en énergie électrique de l'énergie thermique produite par des désintégrations nucléaires.

On peut distinguer deux types : le premier fait appel à la décomposition de substances radio-actives naturelles ou artificielles qui produit de la chaleur. Celle-ci est transmise à un générateur thermo-électrique à semi-conducteur en tellurure de plomb par exemple. Cet ensemble a été utilisé pour alimenter en énergie électrique l'appareillage qui était sur la Lune au cours des expériences Apollo. La substance radio-active était le plutonium 238. La puissance est limitée, c'est pourquoi ce dispositif ne semble pas avoir d'avenir au stade actuel des connaissances.

Par contre, le second type, qui fait appel aux réactions nucléaires dans une pile nucléaire, semble plus intéressant. En effet, la température à laquelle il permet de porter les soudures chaudes des thermocouples est plus élevée et peut atteindre quelques centaines de degrés Celsius. Cette caractéristique permet à l'appareil de délivrer des puissances plus fortes de quelques centaines de watts. Malheureusement, la masse de ces générateurs, due aux systèmes de protection contre les radiations, semble être un obstacle majeur à leur emploi dans les véhicules spatiaux.

Accumulateurs

Un accumulateur est un système électrochimique réversible qui transforme une énergie chimique en une énergie électrique. Grâce à cette réversibilité, un accumulateur peut se recharger quand il est parcouru par un courant en sens inverse de celui de décharge. On distingue deux types d'accumulateurs : ceux dont les électrodes sont en plomb et l'électrolyte un acide, et ceux à électrolyte alcalin.

Accumulateurs au plomb

L'électrode positive peut être composée de plomb, ou de plomb et d'antimoine, ou de plomb et de calcium. L'électrode négative est en plomb poreux. L'électrolyte est un mélange d'eau et d'acide sulfurique dont la masse/volume se situe entre 1,2 et 1,3 kg/dm³ suivant les usages et le degré de charge. A titre d'exemple, nous pouvons indiquer 1,28 pour les batteries d'automobile, 1,20 pour les batteries fixes.

On remarque qu'au cours de la décharge (*fig.* 15), deux molécules d'acide disparaissent et deux molécules d'eau apparaissent. Ce phénomène fait décroître la concentration en acide. La résistance interne augmente, car la solution $PbSO_4$ isole les électrodes. La force électromotrice diminue. Au cours de la charge, l'eau s'évapore ; il y a électrolyse de l'eau avec dégagement d'hydrogène et d'oxygène qui entraîne des vapeurs acides, c'est pourquoi il est indispensable, pour des raisons de sécurité, de ventiler correctement les locaux qui renferment des batteries d'accumulateurs au plomb.

Avec une densité de 1,3 kg/dm³, la force électromotrice d'un élément à température ambiante de 25 °C est 2,05 volts. Dans un accumulateur au plomb, il y a trois réactifs : Pb, PbO_2, H_2SO_4. La loi de Faraday permet de calculer les quantités de ces réactifs qui évoluent au cours des réactions. Pour une décharge de 1 Ah ou 3 600 coulombs : 3,66 g d'acide sulfurique H_2SO_4 sont consommés, 3,86 g de plomb sont transformés en $PbSO_4$ et 4,46 g de PbO_2 sont transformés en $PbSO_4$.

La capacité dépend de la température et de la vitesse de décharge. Le rapport entre la capacité réelle et la capacité théorique, que l'on devrait avoir en fonction des réactifs, est appelé coefficient d'utilisation et sa valeur se situe aux environs de 0,25. Cette faible valeur est due en partie à la formation d'un revêtement non conducteur de sulfate sur les plaques, à la diminution de la conductibilité de l'électrolyte, à la diminution de la porosité des plaques.

La formation de sulfate sur les plaques est fonction de l'intensité de décharge ; elle entraîne une diminution de la porosité par obstruction des pores et empêche toute diffusion à l'intérieur des plaques. C'est pourquoi les batteries destinées à fournir des fortes intensités ont des plaques minces.

On peut distinguer quatre caractéristiques principales :

— La force électromotrice E, différence de potentiel aux bornes quand la batterie ne débite aucun courant et qui est à l'origine de la tension U, différence de potentiel aux bornes quand la batterie se décharge dans un circuit extérieur. La relation qui relie E à U est $U = E - rI$, dans laquelle r est la résistance interne. L'idéal serait d'avoir une tension constante en fonction du temps, très voisine de E et indépendante du courant de décharge. En réalité il n'en est rien. En effet, nous avons noté que la formation de sulfate sur les plaques était fonction de l'intensité, elle dépend donc de I. D'autre part, la résistance interne n'est

Tableau I

Potentiel V_0 (en volts) en fonction du type de réaction et de la température, dans une pile à combustible

Type de réaction \ Température	300 °K	600 °K	900 °K	1 200 °K
$2C + O_2 \rightarrow 2CO$	0,70	0,84	0,98	1,12
$C + O_2 \rightarrow CO_2$	1,02	1,02	1,02	1,02
$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$	1,18	1,11	1,03	0,95
$2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2$	1,33	1,20	1,06	0,92

Équation fondamentale **Fig. 15**

$$PbO_2 + Pb + 2H_2SO_4 \underset{\text{charge}}{\overset{\text{décharge}}{\rightleftarrows}} 2PbSO_4 + 2H_2O$$

Équations chimiques de chaque électrode

— à la décharge, sur l'électrode positive :

$$PbO_2 + H_2SO_4 + H_2 \rightarrow PbSO_4 + 2H_2O$$

— à la décharge, sur l'électrode négative :

$$SO_4 + Pb \rightarrow PbSO_4$$

— au cours de la charge, sur l'électrode positive :

$$SO_4 + PbSO_4 + 2H_2O \rightarrow PbO_2 + 2H_2SO_4$$

— au cours de la charge, sur l'électrode négative :

$$PbSO_4 + H_2 \rightarrow Pb + H_2SO_4$$

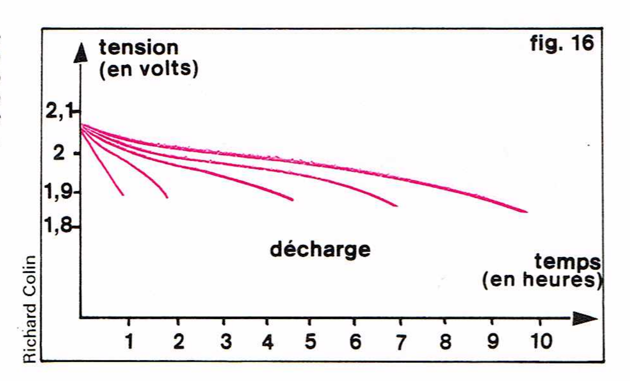
▲ *Tableau I : potentiel normal V_0 en fonction du type de réaction et de la température, dans une pile à combustible. Figure 15 : équation fondamentale de l'accumulateur au plomb et équations chimiques de chaque électrode.*

▼ *Une batterie d'accumulateurs au plomb utilisée pour l'automobile.*



C. Dani

▶ *Figure 16 : variations de tension en fonction du temps et de la vitesse de décharge pour les accumulateurs au plomb.*



pas nulle, d'où le retrait du produit *rI*. Enfin, E diminue en fonction du temps, car les deux électrodes deviennent semblables. Voir *figure* 16 les variations de la tension en fonction du temps et de la vitesse de décharge.

— La résistance interne est très faible, de l'ordre de 10^{-2} à 10^{-4} ohm. Un court-circuit passager peut être acceptable pour une pile qui a une résistance plus élevée, mais ne peut l'être pour un accumulateur au plomb.

— La capacité, qui est exprimée généralement en ampères heure (Ah), est la quantité d'électricité que l'accumulateur peut fournir sans être rechargé. Elle est proportionnelle à la masse des plaques et comprise entre 12 et 15 Ah par kg de plaque. La capacité commerciale correspond à une décharge en 10 heures. En énergie, la capacité se situe entre 20 et 35 Wh par kg de plaque.

— Le rendement en quantité d'électricité est le rapport entre la quantité d'électricité fournie à la décharge et la quantité d'électricité emmagasinée à la charge. Il dépend de la vitesse de décharge et varie de 0,8 à 0,9.

Les éléments sont associés en série pour former une batterie. Le nombre d'éléments dépend de la tension que l'on désire obtenir. Pour les automobiles, on associe six éléments pour obtenir 12 volts.

Le point de congélation de l'électrolyte est — 50 °C pour une densité de 1,26 et — 70 °C pour une densité de 1,30.

▼ *Figure 17 : équation fondamentale de l'accumulateur alcalin fer-nickel et équations chimiques de chaque électrode. Figure 18 : équation fondamentale de l'accumulateur alcalin argent-zinc et équations chimiques de chaque électrode.*

Équation fondamentale **Fig. 17**

$$Ni_2O_3 + 2KOH + Fe \underset{\text{charge}}{\overset{\text{décharge}}{\rightleftarrows}} 2NiO + 2KOH + FeO$$

Équations chimiques de chaque électrode

— à la décharge, sur l'électrode positive :

$$Ni_2O_3 + 2K + H_2O \rightarrow 2KOH + 2NiO$$

— à la décharge, sur l'électrode négative :

$$Fe + 2OH \rightarrow H_2O + FeO$$

— au cours de la charge, sur l'électrode positive :

$$2NiO + 2OH \rightarrow Ni_2O_3 + H_2O$$

— au cours de la charge, sur l'électrode négative :

$$FeO + 2K + H_2O \rightarrow Fe + 2KOH$$

Équation fondamentale **Fig. 18**

$$AgO + Zn + H_2O \underset{\text{charge}}{\overset{\text{décharge}}{\rightleftarrows}} Ag + Zn(OH)_2$$

Équations chimiques de chaque électrode

— à la décharge, sur l'électrode positive :

$$AgO + 2K + H_2O \rightarrow Ag + 2KOH$$

— à la décharge, sur l'électrode négative :

$$Zn + (OH)_2 \rightarrow Zn(OH)_2$$

— au cours de la charge, sur l'électrode positive :

$$Ag + 2OH \rightarrow AgO + H_2O$$

— au cours de la charge, sur l'électrode négative :

$$Zn(OH)_2 + 2K \rightarrow Zn + 2KOH$$

Les batteries en plomb sont couramment utilisées pour le démarrage des moteurs à essence et des moteurs Diesel, dans les sous-marins pour la propulsion avec des moteurs à courant continu, dans l'industrie comme source de secours en cas de perte de réseau, dans de nombreux équipements et, en règle générale, partout où il faut une tension pratiquement constante et non ondulée.

Accumulateurs alcalins

L'électrolyte est une solution alcaline, les électrodes sont, suivant le type d'accumulateur, du fer-nickel, du cadmium-nickel, de l'argent-zinc.

Dans *l'accumulateur fer-nickel*, l'électrode positive est en hydroxyde de nickel et l'électrode négative en poudre fine de fer. L'électrolyte est une solution d'hydroxyde de potassium.

Contrairement à l'accumulateur au plomb, à la charge comme à la décharge (*fig.* 17), la solution reste inchangée et il n'y a pas de vapeur dangereuse dégagée, mais seulement de la vapeur d'eau. L'électrolyte ne fournit que les ions qui rendent le milieu conducteur et n'entre pas dans la réaction, c'est pourquoi sa densité ne change pas, donc ne peut indiquer l'état de charge.

Cet accumulateur doit fonctionner entre — 10 °C et + 46 °C sous peine d'une baisse importante du rendement, qui est de toute manière inférieur à celui d'une batterie au plomb. Sa tension stabilisée est 1,35 V. Son poids est relativement faible; il est robuste et nécessite très peu d'entretien. Ces batteries peuvent être étanches et remplacer les piles.

L'accumulateur cadmium-nickel ne se différencie pratiquement du précédent que par la constitution de l'élément actif de l'électrode négative, qui est en cadmium. La force électromotrice est 1,3 volt. Les électrodes frittées présentent par rapport aux électrodes normales une résistance interne plus faible et un coefficient d'utilisation plus élevé. Pour une décharge de 10 h, la tension baisse de 1,3 à 1,2 V. Pendant la charge, la tension s'élève de 1,2 à 1,4 V en 5 h environ.

Dans l'*accumulateur argent-zinc*, la force électromotrice est sensiblement égale à 1,5 V. Les capacités en énergie par unité de masse (130 Wh/kg) et par unité de volume (300 Wh/dm³) sont importantes, de l'ordre de six fois supérieures à celles de l'accumulateur au plomb (*fig.* 18).

Les batteries argent-zinc sont couramment utilisées dans l'aviation. Mis à part les batteries étanches dans lesquelles l'hydrogène et l'oxygène se combinent grâce à des catalyseurs, il faut prévoir dans les autres des orifices d'échappement des gaz produits au cours de la charge.

Pour l'*accumulateur zinc-air*, la capacité en énergie peut atteindre 170 Wh/kg. La chaîne dissymétrique est composée de l'oxygène de l'air, d'hydroxyde de potassium et de zinc.

Stockage d'énergie mécanique

L'énergie mécanique se présente sous différentes formes qui sont associées soit à la position d'un objet dans un champ de forces — c'est l'*énergie potentielle* — soit au mouvement d'un objet — c'est l'*énergie cinétique*. Il va donc exister, selon sa forme, différentes façons de stocker l'énergie mécanique.

Énergie potentielle

Cette énergie est donc liée à la position d'un objet dans un champ de forces. Il existe différents types de champs de forces, le plus connu étant, bien sûr, le champ de gravitation dû à la pesanteur. Si l'on considère ce dernier cas, il suffit donc d'élever un objet par rapport à un niveau pris comme référence pour lui communiquer une énergie potentielle dont l'expression est de la forme : $\Delta E = mgh$. L'accroissement d'énergie ΔE est proportionnel à la masse m, à l'accélération de la pesanteur g et à la hauteur h dont l'objet a été soulevé.

L'exemple le plus simple de ce type de stockage est donné par les poids d'une horloge dont l'énergie potentielle acquise lors de leur remontée est utilisée ensuite pour actionner le mécanisme d'horlogerie.

A une plus grande échelle, les barrages-réservoirs qui permettent de mettre en réserve de grandes quantités d'eau sont des dispositifs de stockage dans lesquels

l'énergie potentielle de l'eau est conservée en attendant sa transformation en électricité par turbinage dans l'usine hydro-électrique associée au barrage. Il existe de nombreux barrages de ce type qui ont un fonctionnement saisonnier : l'eau recueillie au printemps ou en été est stockée pour être utilisée en hiver lors des périodes de forte consommation d'électricité.

Une application de grand intérêt au cycle de marche journalier est constituée par la *station de pompage*. Le fonctionnement d'une telle installation exige un bassin supérieur et un bassin inférieur dont les niveaux présentent une différence de hauteur sensible. Une conduite relie les deux bassins en traversant en partie basse une usine comportant des pompes et des turbines, ou des machines réversibles « pompes-turbines ». L'énergie de nuit ou de week-end est utilisée pour pomper de l'eau du bassin inférieur vers le bassin supérieur où elle est stockée. Durant les journées ouvrables, aux heures de fortes consommations, l'eau stockée est relâchée du bassin supérieur vers le bassin inférieur au travers de turbines pour que son énergie potentielle soit convertie en électricité. Le fonctionnement de telles usines est donc très simple. Le rendement global de l'opération est de 70 % ; on espère pouvoir atteindre 75 % sur des installations nouvelles.

La rentabilité d'une station de pompage est très dépendante du réseau avec lequel cette dernière est connectée. L'énergie de pointe produite par la station doit être évidemment meilleur marché que celle qui serait produite par les moyens conventionnels. L'énergie utilisée pour le pompage doit être fournie par des usines délivrant l'énergie la moins chère possible. Des études ont montré que ce type de stations devrait jouer un rôle important d'ici à une vingtaine d'années ; leur place pourrait prendre 10 à 20 % de la puissance installée. Elles fonctionneraient à partir d'énergie électrique provenant de centrales nucléaires ou de centrales à charbon, ces deux sources énergétiques étant probablement les plus économiques pour encore une longue période.

Pour installer des stations de pompage, il faut malheureusement disposer de sites qui se prêtent naturellement à l'implantation de telles installations. Ces sites existent mais en nombre limité. Pour cette raison, on étudie la possibilité de transformer certains barrages actuels en stations de pompage en leur associant un réservoir inférieur souterrain qui serait creusé dans le sol à une profondeur convenable. Ces solutions très onéreuses ne seront mises en œuvre que lorsque le coût de l'énergie de pointe qu'elles seraient susceptibles de produire deviendra compétitif.

Pour terminer ce paragraphe consacré à l'énergie potentielle, remarquons que pour certains types de forces, il n'est pas nécessaire de faire appel à la notion de champ. Ainsi, un ressort exerce une force proportionnelle à son allongement l, ce qu'exprime la relation : $F = -Kl$, avec K constante du ressort. En tendant ou en comprimant un ressort, on lui fait emmagasiner de l'énergie qu'il est susceptible ensuite de restituer à la demande. Le fonctionnement des ressorts a été examiné dans le chapitre *Transformations de l'énergie*.

Énergie cinétique

D'après la théorie de la relativité restreinte, la masse d'un corps est fonction de sa vitesse. La modification de la masse est liée à la variation d'énergie cinétique par la relation bien connue : $E_c = c^2 \Delta m$, c étant la vitesse de la lumière.

Dans notre monde physique, où les vitesses sont de très loin inférieures à la vitesse de la lumière, on peut faire l'approximation suivante en intégrant l'équation : $E_c = 1/2\ mv^2$. Dans cette relation, m représente la masse du corps en repos et E_c la variation d'énergie cinétique du corps lorsque sa vitesse passe de 0 à v.

Si l'on considère des mobiles en rotation autour d'un axe à la vitesse angulaire ω, l'énergie cinétique de rotation est donnée par la relation : $E_c = 1/2\ I\omega^2$, dans laquelle I est le moment d'inertie par rapport à l'axe de rotation.

L'énergie cinétique d'un corps au repos est nulle, d'après les expressions ci-dessus, dans le système de référence adopté.

Une des applications les plus répandues de stockage d'énergie mécanique est constituée par le *volant*, dont le principe est connu depuis la très haute antiquité. C'est la pièce essentielle du tour du potier par exemple ; dans cet appareil, le volant sert à stabiliser la vitesse. L'énergie cinétique stockée dans le volant joue un rôle de tampon : elle est successivement chargée et déchargée comme l'eau d'un réservoir de régulation de débit. La présence d'un volant s'impose donc sur une machine tournante chaque fois que le couple est irrégulier.

Sans la présence de volants, le développement des machines alternatives à vapeur ou à combustion interne aurait rencontré de grandes difficultés.

Comme dispositif de stockage d'énergie, le volant est utilisé sur de nombreuses machines tournantes. On citera l'exemple des machines à estamper à volant, où l'énergie nécessaire est stockée progressivement par mise en vitesse d'un volant pour être libérée dans sa quasi-totalité pendant le temps très bref du travail mécanique de la machine.

Une autre application est celle de l'alimentation de dispositifs que l'on veut rendre indépendante des petites fluctuations du réseau normal d'alimentation. C'est le cas des barres de contrôle des réacteurs nucléaires — pour éviter l'arrêt intempestif du réacteur en cas de défaut d'alimentation fugitif du réseau, les dispositifs électriques de maintien des mécanismes de commande sont alimentés par des groupes tournants dotés d'un volant. Ce dernier est dimensionné pour que l'alimentation des mécanismes ne soit pas sensible à la majorité des petits défauts que l'on constate sur les réseaux. Autre exemple : les pompes de réfrigération du cœur en cas de disparition totale de l'alimentation électrique.

Il faut bien noter que le maintien du volant en rotation à vitesse constante ne consomme aucune énergie. Il y a consommation seulement pendant le démarrage et la mise en vitesse de la machine munie de son volant.

Récemment encore, on pensait que le rôle des volants resterait limité à des applications comme celles données en exemple ci-avant, qui ne nécessitent pas le stockage de grosses quantités d'énergie. Cette position trouvait sa justification dans la difficulté à assurer la bonne tenue mécanique des volants. Cette situation a radicalement changé avec l'apparition de nouveaux matériaux, en particulier les matériaux composites à base de fibres de verre ou de carbone. Ces matériaux ont des densités notablement inférieures à celle de l'acier mais leur résistance mécanique est tellement meilleure que leur emploi sur des volants laisse espérer des résultats très prometteurs.

Il apparaît donc possible de stocker aujourd'hui dans des volants des quantités importantes d'énergie ; parmi les applications envisagées, on peut citer le stockage d'énergie électrique pour assurer la fourniture d'énergie de pointe. Ces stations seraient placées près des lieux de consommation. La mise en vitesse des volants serait effectuée durant les périodes de nuit où l'on peut disposer d'énergie électrique abondante et bon marché. Cette énergie stockée serait ensuite restituée pendant les périodes de consommation de pointe de la journée. Ce genre d'installation pourrait concurrencer avantageuse-



Photothèque E. D. F. - Sodel - M. Brigaud

▲ ***La station de pompage de Revin (Ardennes) ; cet ensemble de grande puissance (800 MW) constitué de deux bassins présentant une différence de niveaux permet le pompage de l'eau du niveau inférieur au bassin supérieur durant les heures creuses. Durant les heures de forte consommation, l'eau stockée est relâchée. Ce type de station devrait jouer un rôle important d'ici une vingtaine d'années.***

ment en coût et en espace utilisé les stations de pompage dans un proche avenir.

La mise au point de ces nouveaux volants va demander encore d'importants efforts de recherche et de développement. Leur conception, lorsqu'on utilise des matériaux composites, s'écarte en effet des habitudes constructives en la matière. Il faut de plus limiter les frottements de toutes sortes qui absorbent inutilement de l'énergie. Parmi les causes de frottement, il faut éliminer la perte dite « par ventilation » due à la rotation à grande vitesse du mobile dans l'air. Il y aurait donc lieu de sceller ces volants dans des enceintes au sein desquelles on aurait fait le vide au préalable.

De tels groupes tournant sous vide pourraient être installés sur des automobiles électriques. La capacité de stockage d'énergie d'un volant est de loin supérieure à celle des batteries traditionnelles : 10 à 30 fois suivant les matériaux utilisés. De tels véhicules seraient donc plus intéressants que les voitures électriques fonctionnant sur batteries. Ils pourraient, par freinage électrique, récupérer la variation d'énergie cinétique du véhicule, ce qui améliorerait encore leurs performances.

Une autre façon de stocker de l'énergie mécanique est de comprimer un gaz. La théorie cinétique des gaz nous apprend en effet que la pression d'un gaz sur les parois du récipient qui le contient n'est autre que la force moyenne exercée sur l'unité de surface de la paroi par les molécules en mouvement en train de la heurter. Les mécaniciens appellent souvent *énergie élastique* l'énergie contenue dans un gaz ou une vapeur sous pression. Cette énergie est facilement transformée en travail. On utilise largement cette possibilité grâce à l'air comprimé entre 7 et 10 bars distribué par réseau. Celui-ci présente sur l'électricité l'avantage de pouvoir être stocké dans des réservoirs de pression. Il est donc possible de garantir une permanence de l'alimentation en fluide de travail en cas de défaillances passagères du système de production d'air comprimé. Cette possibilité confère aux réseaux d'air comprimé une grande souplesse et une grande sûreté de fonctionnement.

L'air comprimé est un excellent fluide de travail pour beaucoup d'applications, ce qui explique son emploi très répandu.

Dans certains cas, on souhaite disposer d'un fluide incompressible pour entraîner des moteurs et manœuvrer des vérins. L'huile sous pression est le fluide tout désigné pour ces applications. L'huile est en général mise en charge par des pompes, mais pour éviter à celles-ci un fonctionnement continu, l'huile sous pression est stockée sous une couverture d'air comprimé dans des accumulateurs. On profite alors de l'incompressibilité de l'huile et des qualités élastiques de l'air comprimé. Ce mariage heureux est utilisé dans tous les systèmes oléo-pneumatiques et l'on pense alors aux suspensions de voitures. L'accumulateur utilisant un gaz sous pression est d'un emploi très répandu qui va du ballon pneumatique de chauffage central aux gros accumulateurs d'eau d'injection des centrales nucléaires à eau légère qui permettent en cas de rupture accidentelle des circuits normaux de réfrigération de refroidir le cœur par de l'eau sous pression de gaz comprimé, sans aucune intervention de matériel mécanique ou électrique.

On envisage de stocker de grandes quantités d'énergie électrique dans des stations rappelant dans leur principe les stations de pompage. L'idée consiste à comprimer de l'air dans des cavités souterraines, naturelles ou artificielles, à l'aide de compresseurs utilisant de l'énergie électrique bon marché, produite la nuit ou le week-end. Aux heures de pointe, cet air comprimé est détendu dans les motogénérateurs qui reversent l'électricité produite au réseau. A la différence de la station de pompage, le système fonctionne avec un seul réservoir de volume limité et capable de tenir la pression, le second étant remplacé par l'atmosphère. Un autre avantage que présenterait ce genre de station sur les stations de pompage hydrauliques consiste dans le fait qu'il serait probablement plus facile de trouver des sites convenables. Le réservoir étant souterrain, l'emprise sur l'environnement serait donc faible. Pour faire fonctionner des installations de ce type, il faudrait disposer de compresseurs et de moteurs à air de grandes dimensions et possédant un bon rendement. Dès que de tels matériels seront disponibles dans des conditions économiques acceptables, on peut penser que des stations fonctionnant à l'air comprimé se développeront.

Stockage d'énergie thermique

Généralités - Notions de rendements de stockage

Dans de nombreuses industries, la consommation d'énergie thermique varie au cours de la journée ou plus généralement au cours d'un cycle, aussi souhaite-t-on disposer durant les périodes de pointe d'un apport supplémentaire d'énergie. On peut alors avoir recours à des sources d'énergie thermique nobles (énergie électrique, énergie de combustion), mais ces dernières sont coûteuses, et il serait préférable d'utiliser de l'énergie thermique stockée à une période excédentaire ou obtenue à l'aide d'une source de chaleur bon marché (énergie solaire, énergie éolienne, énergie résiduelle des centrales nucléaires, des réacteurs chimiques, etc.).

L'énergie thermique est emmagasinée sous forme d'enthalpie dans une enceinte de stockage. L'enthalpie stockée dépend de la température de stockage, T_s, et la quantité de chaleur libérée est liée à la température d'utilisation T_u. Aussi, dans ces conditions, par unité de masse du récepteur thermique, la chaleur maximale libérée ou stockée est égale à : $H(T_s) - H(T_u)$, où H représente l'enthalpie massique du récepteur.

Si M désigne la masse du récepteur, l'énergie maximale emmagasinée E entre la température de stockage et la température d'utilisation est telle que :

$$E = M\,(H(T_s) - H(T_u)).$$

Le réservoir de stockage n'étant ni adiabatique, ni uniforme en température, une partie de l'énergie E, soit Q, est transmise au milieu extérieur par conduction et convection. On peut alors définir un rendement de stockage entre les températures T_s et T_u, soit :

$$(1) \qquad R = 1 - \frac{Q}{M\,(H(T_s) - H(T_u))}$$

Le rendement ainsi défini représente un rendement intégral durant une période où la température du corps récepteur passe de la température de stockage à celle d'utilisation. Lorsque la période de stockage et celle d'utilisation ont lieu simultanément, on introduira plutôt le rendement différentiel R′ tel que :

$$(2) \qquad R' = 1 - \frac{dQ}{M\,dH}$$

Avec nos conventions, un rendement R′ inférieur à 1 ($dQ > 0$, $dH > 0$) correspond à une période de stockage et un rendement supérieur à 1 ($dQ > 0$, $dH < 0$) correspond à une période d'utilisation.

Le choix du récepteur thermique est fonction des valeurs respectives des températures T_s et T_u. Deux possibilités peuvent être envisagées : — choix d'une substance ne présentant pas de changement de phase entre T_s et T_u; — choix d'une substance avec un seul changement de phase entre T_s et T_u.

En effet, il est difficile, pour des raisons technologiques évidentes, de concevoir un réservoir de stockage avec une substance présentant deux changements de phases entre T_s et T_u.

On a respectivement :

— pour le 1er choix :

$$M\,(H(T_s) - H(T_u)) = V\rho C_p\,(T_s - T_u)$$

— pour le 2e choix :

$$M\,(H(T_s) - H(T_u)) = MC_{p1}\,(T_s - T_i) + MC_{p2}\,(T_i - T_u) + M\Lambda\,(T_i).$$

Dans les relations précédentes V, ρ, C_p, C_{p1}, C_{p2}, Λ, T_i représentent respectivement le volume, la masse volumique, la capacité calorifique massique, la capacité calorifique massique dans l'état 1, la capacité calorifique massique dans l'état 2, la chaleur latente massique de changement d'état et la température du changement d'état de la substance réceptrice d'énergie thermique.

Lorsque la substance subit un changement d'état, la température d'utilisation se limite à la température du changement d'état, et, dans ces conditions, on aura pour le deuxième choix :

$$M\,(H(T_s) - H(T_u)) = V\,(\rho C_{p1}\,(T_s - T_u) + \rho\Lambda\,(T_u)).$$

Si nous écrivons, désormais, la chaleur perdue au cours d'une période de durée τ sous la forme :

(3) $$Q = \frac{1}{\tau}\int_0^\tau US\,(T_u - T_e),$$

le rendement intégral R sera donné par la relation :

(4) $$R = 1 - \frac{1}{\tau}\frac{S}{V}\frac{\int_0^\tau U\,(T_u - T_e)}{[\rho C_p\,(T_s - T_u) + \rho\Lambda\,(T_u)]}$$

Dans la relation **(4)**, S, U, T_e représentent respectivement la surface extérieure du réservoir de stockage, un coefficient de transfert global du réservoir entre la substance intérieure et le milieu extérieur, la température du milieu extérieur. Pour des températures T_s, T_u, T_e et une durée du cycle données, le rendement intégral de stockage dépend des paramètres suivants : — le rapport S/V, ou aire spécifique du réservoir de stockage ; — le coefficient de transfert U ; — les produits ρC_p et $\rho\Lambda$. Le rendement intégral sera d'autant plus grand que les valeurs de S/V et U seront faibles et que celles des produits ρC_p et $\rho\Lambda$ seront plus importantes.

Dans ce qui suit, nous allons tout d'abord donner les propriétés physico-chimiques de certaines substances thermoréceptrices et préciser les meilleures formes géométriques des réservoirs de stockage ainsi que les relations permettant le calcul du coefficient de transfert global U. Puis nous indiquerons quelques applications de stockage de chaleur.

Valeurs de ρ, Λ et ρC_p pour quelques récepteurs thermiques

Dans les *tableaux* II et III sont reportées respectivement les valeurs de ρ, ρC_p et Λ pour quelques substances thermo réceptrices. A l'exception de l'ammoniac, toutes ces valeurs correspondent à la pression atmosphérique.

Les deux tableaux nous conduisent aux conclusions suivantes : les gaz purs loin de leur condition de saturation sont difficilement envisageables comme récepteurs de chaleur. Les liquides et les solides présentent des valeurs du produit ρC_p voisines et l'eau est le corps pur ayant la plus grande valeur du produit ρC_p.

Si on utilise une substance subissant une transformation de phase, on ne peut pas, par suite de la très grande variation de masse volumique, envisager un changement de phase de l'état vapeur à l'état liquide, et réciproquement. En revanche, les changements de phase liquide-solide sont susceptibles d'être considérés ; ils permettent un stockage de chaleur très supérieur à l'utilisation d'un constituant solide ou liquide ne subissant pas de changement de phase. Une difficulté apparaît cependant, car la solidification doit être réalisée de manière uniforme dans tout le réservoir avec formation de cristaux de taille bien définie ne devant pas se fixer sur les différentes surfaces des récepteurs et de sources de chaleur situées à l'intérieur de l'enceinte de stockage. On peut lever cette difficulté en créant dans le réservoir une agitation, qui augmente malheureusement les frais de fonctionnement du stockage.

Si l'on se réfère aux très nombreuses recherches en cours, ce type de stockage est cependant loin d'être exclu. La substance réceptrice peut être soit un corps pur, soit un eutectique. Il est d'ailleurs fort probable que des réservoirs thermiques de ce genre, fondés sur la transformation liquide-solide d'un corps pur ou d'un eutectique, soient déjà utilisés de manière industrielle.

Forme géométrique des réservoirs de stockage

Nous verrons par la suite que, dans certains cas, les réservoirs de stockage sont naturels ; leur forme géométrique est donc imposée ; mais, lorsqu'on aura le choix, on sélectionnera la forme conduisant à la plus petite valeur de l'aire spécifique. Dans le *tableau* IV, nous avons reporté les aires spécifiques de réservoirs de forme géométrique bien définie.

Pour une dimension principale donnée, l'aire spécifique minimale s'obtient pour le parallélépipède où les deux autres dimensions sont très grandes devant la dimension principale. A la limite, on aboutit au feuillet d'épaisseur x et d'aire spécifique $2/x$. Les formes symétriques sphérique, cylindrique, cubique conduisent à la même valeur de l'aire spécifique, mais la capacité de stockage d'un réservoir cubique est sensiblement deux fois celle d'un réservoir sphérique de même dimension principale.

Tableau II
Chaleurs latentes massiques de changement de phase Λ

Phases en présence	Corps	T (en °C)	P (en atm)	ρ_1 (en kg par m³)	ρ_2 (en kg par m³)	Λ (en kcal par kg)
Vapeur-liquide	Eau	100	1	0,597	958	540
Vapeur-liquide	Ammoniac	5	5	3,73	650	294
Liquide-solide	Potassium	63,5	1	830	860	14,7
Liquide-solide	Sodium	97,5	1	970	970	27,4

Tableau III
Capacités calorifiques massiques C_p et produits ρC_p

Nature de la phase	Corps	T (en °C)	ρ (en kg/m³)	C_p (en kcal/kg/°K)	ρC_p (en kcal/m³/°K)
Gaz	Hydrogène	100	0,065 7	3,46	0,227
	Azote	100	0,915	0,245	0,224
	Oxygène	100	1,04	0,493	0,512
	Anhydride carbonique	100	1,97	0,210	0,413
	Ammoniac	100	0,564	0,54	0,304
		5 (5 atm)	3,73	0,50	1,86
	Vapeur d'eau		0,597	0,47	0,280
Liquide	Eau	100	958	1,007	965
	Éthanol 100%	40	772	0,63	486
	Éthanol 95 %	40	787	0,70	551
	Éthanol 50 %	40	897	0,94	843
	Ammoniaque	5 (5 atm)	650	1,10	715
	Potassium	63	830	0,20	166
	Sodium	97,5	970	0,33	320
Solide	Potassium	63	860	0,18	155
	Sodium	97,5	970	0,30	291
	Brique réfractaire	800	2 500	0,20	500
	Graphite	800	2 260	0,39	881
	Bois de chêne	50	865	0,57	493

▲ Tableau II : chaleurs latentes massiques de changement de phase (Λ) de quelques substances thermoréceptrices, pour les températures, pressions et masses volumiques citées en référence. Tableau III : capacités calorifiques massiques C_p et produit ρC_p de quelques substances thermoréceptrices pour les températures et les masses volumiques citées en référence.

Calcul du coefficient de transfert U

Pour les réservoirs naturels, étant donné leur dimensionnement et leur fonctionnement, on ne cherche pas à diminuer les pertes vers le milieu extérieur ; mais cela se révèle indispensable dans le cas des réservoirs artificiels. On y parvient en recouvrant le réservoir d'une épaisseur e d'isolant de conductibilité thermique λ. Cela constitue dans ce cas la résistance principale au transfert thermique, car les résistances de convection sur les surfaces externes et de conduction dans les parois de l'enceinte sont négligeables.

Dans ces conditions, le profil de température dans l'isolant, supposé unidimensionnel, s'obtient par la résolution de l'équation de la conduction en régime transitoire, soit :

(5) $\alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\partial T}{\partial \tau}$ où α est la diffusivité thermique de l'isolant avec comme conditions aux limites :

$$T = T_u \text{ à } x = 0 \text{ et } T = T_e \text{ à } x = e.$$

Si T_u varie au cours du temps, le profil de température dans l'isolant se modifiera au cours du temps et, à chaque instant, le coefficient de transfert U sera obtenu par :

(6) $$U = \frac{-\lambda\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=e}}{T_u - T_e}.$$

Quand les variations de températures de la substance accumulatrice sont faibles ou lentes, le régime station-

Tableau IV

Surfaces, volumes et aires spécifiques de différentes formes géométriques utilisées pour le stockage de l'énergie thermique

Formes géométriques du réservoir	Surfaces	Volumes	Aires spécifiques
Sphérique	πx^2	$\frac{\pi x^3}{6}$	$\frac{6}{x}$
Cylindrique symétrique	$\frac{3\pi x^2}{2}$	$\frac{\pi x^3}{4}$	$\frac{6}{x}$
Cylindrique	$\frac{\pi x^2}{2} + \pi xy$	$\frac{\pi x^2 y}{4}$	$\frac{4 + \frac{2x}{y}}{x}$
Cubique	$6x^2$	x^3	$\frac{6}{x}$
Parallélépipédique	$2xy + 2xz + 2yz$	xyz	$\frac{2 + \frac{2x}{y} + \frac{2x}{z}}{x}$

▲ ***Tableau IV : surfaces, volumes et aires spécifiques pour différentes formes géométriques de réservoirs servant au stockage de l'énergie thermique.***

naire est sensiblement établi à l'intérieur de l'isolant, et on pourra dans ces conditions prendre pour le coefficient de transfert global U une valeur constante égale à λ/e.

Nous avons donné par ailleurs des valeurs des conductibilités thermiques des principaux matériaux isolants et réfractaires.

Remarque : le calcul du coefficient de transfert U par la relation **(6)** n'est correct qu'à condition que la température du récepteur thermique soit uniforme. Dans le cas contraire, il faudra adjoindre à l'équation **(5)** celle qui traduit les variations de température dans la substance réceptrice et remplacer dans les conditions aux limites la température T_u par la valeur de la température de la substance réceptrice à la paroi du réservoir de stockage.

Quelques applications industrielles du stockage d'énergie thermique

Nous ne rappelons pas ici les accumulateurs de chaleur domestiques (eau chaude ou chauffage), car ils font appel à une source d'énergie noble et coûteuse : l'énergie électrique. Nous nous limiterons à trois exemples de stockage thermique utilisant des sources d'énergie bon marché. Dans ces trois exemples, le corps accumulateur de chaleur ne subit pas de changement de phase au cours du stockage et de l'utilisation.

* *Stockage de chaleur basse température dans les nappes phréatiques peu profondes*

Il s'agit d'un stockage de longue durée dans des milieux naturels proches de la surface et très répandus sur le territoire français. Le principe consiste à introduire dans la nappe de l'eau chaude obtenue à bon marché. De cette manière, on réchauffe la nappe, la roche imbibée d'eau et les épontes de la nappe, augmentant ainsi le volume du stock. Il est certain que le milieu naturel n'est pas isolé et qu'une partie de la chaleur stockée sera perdue (15 à 35 %). De plus, la température des eaux injectées doit être limitée (40 à 50 °C) afin d'éviter une pollution thermique de la nappe (formation de micro-organismes, d'algues, etc.).

La source de chaleur de 40 à 50 °C continue ou discontinue doit être à faible coût. Elle est obtenue par exemple : à l'aide de panneaux solaires ; à l'aide de pompes à chaleur fonctionnant aux heures creuses ; par conjugaison des deux moyens précédents.

Durant la période de stockage, on peut envisager trois types d'utilisation :

— utilisation pour le chauffage domestique, sans relever le niveau thermique du stock, mais en régulant le débit retiré ; il faut alors ajouter éventuellement un chauffage d'appoint à très faible investissement ;

— utilisation directe le jour seulement, avec emploi la nuit d'une pompe à chaleur pour relever le niveau thermique en heures creuses ; l'intérêt du stock est de seconder la pompe à chaleur dont le fonctionnement total en hiver est reporté en partie en été et en heures creuses ;

— utilisation de la source de chaleur du stock pour fournir à l'évaporateur de la pompe à chaleur une source froide à plus haute température, augmentant ainsi son rendement.

Ces trois types d'utilisation peuvent être combinés dans des proportions à optimiser. Ainsi, le stockage en nappe phréatique sera le plus souvent associé à une pompe à chaleur ; s'il ne diminue pas considérablement la puissance nécessaire au fonctionnement de cette pompe, le stockage longue durée en nappe phréatique n'est pas justifié.

Signalons que ce système de stockage peut non seulement servir comme source de chauffage pour des habitations mais aussi pour des serres de cultures. Pour le chauffage d'habitations, comme la nappe phréatique de stockage doit avoir un rayon de 100 m, ce type de chauffage ne pourra être envisagé que pour des agglomérations à faible densité d'occupation des sols.

* *Stockage d'énergie solaire dans des bassins artificiels*

Il s'agit d'un stockage intersaisonnier d'eau chaude dans un bassin de forme prismatique creusé dans le sol. L'eau chaude ainsi stockée peut servir au chauffage et comme eau chaude sanitaire de pavillons situés dans le voisinage des bassins. Chacun des pavillons est muni de panneaux solaires qui se trouvent ainsi répartis dans toutes les directions.

Les études actuelles semblent montrer que ce procédé est rentable même dans des régions où l'utilisation directe de l'énergie solaire aurait pu paraître vouée à l'échec. Le rendement thermique global varie de 50 à 70 %, et pour des bassins de 2 000 à 3 000 m³ la température de l'eau stockée varie de 25 à 55 °C au cours de l'année. La chaleur stockée paraît suffisante, sans nécessiter un apport extérieur de chaleur.

* *Stockage d'énergie thermique dans les récupérateurs ou régénérateurs de chaleur*

Les récupérateurs de chaleur sont utilisés depuis très longtemps dans les industries sidérurgiques pour chauffer les vents alimentant les hauts fourneaux. Ils opèrent généralement de manière cyclique, mais certains, comme le réchauffeur tournant de Ljungström, sont continus. Dans tous ces appareils, la chaleur provenant d'une source de chaleur gazeuse (fumées des hauts fourneaux et gaz de combustion de brûleurs situés à l'intérieur du régénérateur) est transférée à des briques réfractaires dont la disposition est conçue selon l'utilisation des régénérateurs. Les récupérateurs cycliques fonctionnent en parallèle ; ainsi, pendant que les uns stockent de la chaleur, les autres permettent, par une opération inverse, de chauffer les vents d'alimentation des hauts fourneaux.

Pour tous ces appareils, la phase solide emmagasineuse de la chaleur est fixe. De nos jours, on s'oriente de plus en plus vers la conception de récupérateurs de chaleur où la phase solide est mobile (lit fluidisé, lit transporté). On augmente ainsi beaucoup le débit de chaleur transféré et par suite la quantité de chaleur emmagasinée et libérée.